



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.

FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA.

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.

**COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA
CON POLÍMERO ETILENO VINIL ACETATO (EVA).**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.

AUTOR: MAILA PAUCAR MANUEL ELÍAS.

TUTOR: ING. ANÍBAL ÁVILA MONTERO.

QUITO – ECUADOR.

2013

DEDICATORIA

A Dios quien ha guiado mis pasos con amor, fortaleza y fe para cumplir uno de mis más anhelados sueños.

A mis padres Elías Maila y Susana Paucar por ser la razón de mi existencia, que gracias a sus consejos, cariño, esfuerzo diario y apoyo incondicional, hicieron posible que culminara con éxito una etapa más de mi vida.

A mis hermanos, por la confianza que han depositado en mí, por estar siempre conmigo durante el tiempo que implica labrarse una profesión.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar en cada momento de mi vida, por permitirme concluir esta etapa y compartirla con las personas que quiero y aprecio.

A la Universidad Central del Ecuador, en especial a la facultad de Ingeniería Ciencias, Físicas y Matemática, Escuela de Ingeniería Civil, a mis profesores quienes en su gran mayoría supieron transmitirme sus conocimientos, mil gracias les recordare siempre.

Al Ing. Aníbal Ávila Montero tutor de tesis con mucho aprecio, por su tiempo, ayuda, orientación en el desarrollo y culminación de este trabajo de graduación, a los profesores: Ing. Jorge Vázquez, e Ing. Ernesto Ortiz por su colaboración para el desarrollo de la misma y su respectiva calificación.

*Al laboratorio de Suelos y Pavimentos de la **EMMOP-Q**, a todo su personal en especial al Ing. Víctor Molina y al señor Marcelo Pacheco por su colaboración activa en el desarrollo de la presente investigación y la supervisión en los ensayos realizados en el laboratorio, ya que sus comentarios y sugerencias contribuyeron a enriquecer y complementar este trabajo.*

AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL

Yo MAILA PAUCAR MANUEL ELÍAS en calidad de autor del trabajo de investigación o tesis realizada sobre el "COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO ETILENO VINIL ACETATO (EVA)", por la presente autorizo a la UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o de parte de los que contienen esta obra, afines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización, seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Quito, Jueves 24 de Enero del 2013.



Maila Paucar Manuel Elías

C.C: 171999437-6

CERTIFICACIÓN

En calidad de Revisor del Proyecto de investigación: COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO ETILENO VINIL ACETATO (EVA), presentado y desarrollado por el señor MAILA PAUCAR MANUEL ELÍAS, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, considero que el proyecto reúne los requisitos necesarios.

En la ciudad de Quito, a los 4 días del mes de Enero del 2013.

Atentamente:



Ing. Aníbal Ávila Montero

TUTOR

INFORME DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

TEMA: COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO ETILENO VINIL ACETATO (EVA).

ANTECEDENTES

Director de la Carrera de Ingeniería Civil, mediante el oficio No. FI-DCIC-2012-328, de fecha 11 de Junio del 2012, por disposición del Decano de la Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemáticas se autoriza la denuncia de tesis presentado por el señor MAILA PAUCAR MANUEL ELÍAS, a la vez que se me designa como TUTOR.

DESARROLLO DE LA TESIS

Primero se procedió a la recopilación, de la información necesaria para la investigación para el desarrollo adecuado en base a los ensayos, en el asfalto, agregados, diseño de mezclas método Marshall y la incorporación del polímero EVA en la mezcla asfáltica.

Se realizó las siguientes actividades para el desarrollo de la tesis.

- Determinación de las propiedades físicas y mecánicas del ligante asfáltico mediante los ensayos Viscosidad, Penetración, Punto de Reblandecimiento, Ductilidad, Pérdida por calentamiento, Punto de Inflamación, Ensayo de la Mancha y Peso Especifico, los cuales fueron realizados con sus respectivas normas.
- Igualmente se Determinaron las características y propiedades de los agregados a utilizarse realizando los ensayos como son: Porcentaje de Caras Fracturadas, Partículas Alargadas y Planas, Equivalente de Arena, Abrasión, Peso Específico, Absorción y Granulometría los mismos que fueron realizados con sus respectivas normas descrito y detallado en el desarrollo de la tesis, de cada ensayo.
- Se diseño una mezcla asfáltica convencional sin ninguna adición de polímero por el Método Marshall, la cual sirvió de base para las posteriores modificaciones y obtener el porcentaje óptimo de asfalto. Una vez realizado este ensayo, se procedió a incorporar un cierto porcentaje de polímero EVA a diferentes mezclas.
- Finalmente se analizó el comportamiento de la mezcla modificada con los fines de diseño lo cual cumple satisfactoriamente para su aplicación.

El desarrollo de todas estas actividades de la tesis estuvo bajo la supervisión del ingeniero Anibal Ávila Montero en su calidad de Tutor.

CONCLUSIONES

- Se cumplió con el objetivo principal que era buscar el diseño de una mezcla asfáltica modificada óptima que mejore las características físicas -mecánicas de la mezcla convencional, y así disminuir el deterioro y daños viales.
- La mezcla modificada óptima de la investigación quedó constituida por el 60 % de agregado grueso, 40 % de agregado fino, 6,3% de asfalto y 3% de polímero EVA.

En virtud a lo manifestado anteriormente, las actividades desarrolladas han sido satisfactorias y los resultados obtenidos en el transcurso del desarrollo del mismo son los esperados, emito mi aprobación a este trabajo de tesis y recomiendo proseguir el trámite respectivo hasta la graduación del ejecutor.

Atentamente:



Ing. Anibal Ávila Montero

TUTOR



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA, CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICA
SECRETARÍA

RESULTADO DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

CARRERA DE Ingeniería Civil

Quito, 21 Enero 2013.

Señor HAILA PAUGAR MANUEL ELIAS

Tema: COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA
ASFACTICA MODIFICADA CON POLIÉTERO
ETILENO VINIL ACETATO

CALIFICACIÓN:

TRIBUNAL	PROFESOR (A)	NOTA SOBRE VEINTE		FIRMA
		NUMERO	LETRAS	
PROFESOR TITULAR	ING. TORRE VASQUEZ NAHUEL	18.8	MECIENTA 80/100	
PROFESOR TITULAR	ING. ERNESTO ORTIZ A.	19.0	Diez y nueve	
PROMEDIO		18.9	Diez y ocho con nueve	

Dra. Katheryne Carrión Valdivieso
SECRETARIA ABOGADA (E)

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
AUTORIZACIÓN DE LA AUTORIA INTELECTUAL.....	iv
CERTIFICACIÓN.....	v
INFORME DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN.....	vi
RESUMEN TÉCNICO	xix
ABSTRACT.....	xx
CAPITULO 1:	
GENERALIDADES.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. INTRODUCCION.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	3
1.4. JUSTIFICACION.....	3
1.5. ALCANCE.....	3
1.6. METODOLOGIA.....	4
1.7. UBICACIÓN DE LA FUENTE DE MATERIALES A UTILIZARSE.....	5
CAPITULO 2:	
MARCO	
CONCEPTUAL.....	6
2.1. CARACTERISTICA DE LOS MATERIALES.....	6
2.1.1. EL ASFALTO.....	6
2.1.2 PRODUCCIÓN DEL ASFALTO.....	6
2.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS.....	7
2.1.3.1 ADHESIVIDAD A LOS ARIDOS.....	8
2.1.3.2 COMPORTAMIENTO REOLOGICO.....	9
2.1.3.2.1 ENSAYOS EMPÍRICOS DE CONSISTENCIA.....	9
2.1.3.2.2 RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO.....	13

2.1.4 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	17
2.1.4.1 MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL.....	18
2.1.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES GRANULARES.....	19
2.1.5.1 AGREGADO GRUESO.....	19
2.1.5.2 AGREGADO FINO.....	23
2.1.6 EL POLÍMERO.....	26
2.2 COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	28
2.2.1 MEZCLAS MODIFICADAS.....	31
2.3 ENSAYOS DINÁMICOS.....	32
2.3.1 MÓDULO DINÁMICO ELÁSTICO.....	33
2.4 Tensión INDIRECTA.....	34
2.5. ENSAYO CÁNTABRO O DE PÉRDIDA POR DESGASTE.....	36
CAPITULO 3:	
ENSAYOS EN LIGANTE ASFÁLTICO.....	37
3.1. ENSAYO DE VISCOSIDAD SAYBOLT-FUROL (ASTM E-102).....	37
3.2. ENSAYO DE PENETRACION (ASTM D-5).....	39
3.3. ENSAYO DE DUCTILIDAD (ASTM D-113).....	41
3.4. ENSAYO DE PUNTO DE REBLANDECIMIENTO ANILLO Y BOLA (ASTM D-36).....	44
3.5. ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN (ASTM D-92).....	46
3.6. ENSAYO DE PÉRDIDA POR CALENTAMIENTO (ASTM D-6).....	48
3.7. ENSAYO DE LA MANCHA (AASHTO T-102).....	51
3.8. ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO (ASTM D-2419).....	54
3.9. INDICE DE PENETRACIÓN DEL ASFALTO.....	57
CAPITULO 4:	
ENSAYOS EN LOS AGREGADOS.....	59

4.1. POCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS (ASTM D 5821-95).....	59
4.2. EQUIVALENTE DE ARENA (ASTM D-2419).....	60
4.3. ABRASIÓN DE AGREGADO GRUESO MÁQUINA DELOS ÁNGELES.....	64
4.4. PESO ESPECÍFICO AGREGADO FINO (ASTM D-128).....	66
4.5. PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO (ASTM D-127).....	69
4.6. PARTICULAS PANAS Y ALARGADAS (ASTM D-4791).....	70
CAPITULO 5:	
ENSAYOS SOBRE LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	74
MEZCLA ASFÁLTICA.....	74
5.1.1. GRANULOMETRÍA Y MEZCLA DE AGREGADOS.....	74
5.1.1.1. GRANULOMETRÍA (ASTM C-71).....	74
5.1.1.2.MEZCLA DE AGREGADOS.....	76
5.1.2.DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA.....	78
5.1.2.1. METODO MARSHALL (ASTM D-1559).....	78
5.1.2.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	79
5.1.2.3PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO.....	83
5.1.2.3.1 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE.....	83
5.1.2.3.2 ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO.....	83
5.1.2.3.3 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA.....	84
5.1.2.4 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO.....	87
5.2. ENSAYO DE CONTENIDO ASFÁLTICO (ASTM D-2172).....	92
5.3. ENSAYO DE RECUBRIMIENTO Y PELADURA DE ASFALTO EN AGREGADOS (ASTM D-3625).....	94
5.4. ENSAYO CÁNTABRO DE PÉRDIDAPOR DESGASTE (NLT-159/86).....	97

5.4.1. ENSAYO CÁNTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE PARA MEZCLA CON POLIMERO EVA.....	99
5.5. ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO ELÁSTICO (ASTM D-3497).....	101
5.5.1. MODO DE USO DEL SOFTWARE.....	103
5.5.2. DESCRIPCIÓN DEL FORMATO DE RESULTADOS.....	113
5.6. Tensión INDIRECTA (ASTM D-4123).....	120
CAPITULO 6:	
ANALISIS DE RESULTADOS.....	123
6.1. RESULTADOS ENSAYO MARSHALL.....	123
6.2. RESULTADOS ENSAYO CÁNTABRO O PERDIDA POR DESGASTE.....	129
6.3. RESULTADOS MÓDULO DINÁMICO ELÁSTICO O RESILIENTE.....	130
6.4. RESULTADOS Tensión INDIRECTA.....	132
CAPITULO 7:	
ANALISIS DE COSTOS DE PRODUCCIÓN EN PLANTA PARA LA MEZCLA CONVENCIONAL Y LA MEZCLA DE INVESTIGACIÓN.....	134
7.1 INTRODUCCIÓN E IMPORTANCIA.....	134
7.2 COSTOS DIRECTOS.....	134
7.2.1 DEFINICIÓN DE RECURSOS Y COMPONENTES.....	134
7.2.1.1 CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN PARA MEZCLA CONVENCIONAL.....	135
7.2.1.2 COSTOS DIRECTO PARA MEZCLA CONVENCIONAL.....	138
7.2.1.3 COSTOS DIRECTO PARA MEZCLA MODIFICADA.....	140
7.3 COSTOS INDIRECTOS Y JUSTIFICACIÓN.....	141
7.4 COSTO UNITARIO.....	142
7.5 EQUIPO NECESARIO.....	143

7.6 DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO.....	143
7.7 COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE LAS DOS MEZCLAS.....	144
• EJEMPLO 1: DISEÑO DE ESPESOR DE CARPETA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTO FLEXIBLE CON MEZCLA CONVENCIONAL.....	144
• EJEMPLO 2: DISEÑO DE ESPESOR DE CARPETA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTO FLEXIBLE CON MEZCLA MODIFICADA.....	149
CAPITULO 8:	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	158
8.1 CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	158
8.2 RECOMENDACIONES PARA EL USO.....	160
BIBLIOGRAFÍA.....	161

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXOS 1.....	163
ANEXOS 2.....	165
ANEXOS 3.....	166

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Requisitos de los Cementos Asfálticos Según especificaciones del MTOP.....	17
Tabla 2: Tipos de abrasión.....	21
Tabla 3: Cantidades mínimas para ensayo según el tamaño nominal.....	21

Tabla 4: Requisitos Granulométricos para mezclas asfálticas en Planta Según especificaciones del MTOP.....	25
Tabla 5 : Caracterización del Ligante Asfáltico AC-20 de Índice de Penetración 60/70.....	58
Tabla 6. Resultados de los Ensayos en los Agregados.....	73
Tabla 7: Análisis granulométrico de la mezcla de agregados.....	77
Tabla 8: mezcla asfáltica (40% de agregado fino de Mulaló y el 60% agregado grueso de Cashapamba), Método Marshall.....	90
Tabla 9. Propiedades físicas del aditivo REDICOTE AP.....	96
Tabla 10. Resultados del Ensayo Cántabro para mezcla con polímero EVA y para mezcla convencional.....	100
Tabla 11: Resultados del Módulo Dinámico en mezcla modificada para 10°C, 20°C y 40°C.....	117
Tabla 12: Resultados del Módulo Dinámico en mezcla convencional para 10°C, 20°C y 40°C.....	119
Tabla 13 : Resultados del ensayo de Tensión Indirecta en la mezcla modificada.....	122
Tabla 14. Análisis de Resultados de Diseño Marshall según Criterios del Instituto del Asfalto (USA).....	125
Tabla 15. Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral.....	125
Tabla 16. Resultados de Estabilidad y Flujo del ensayo Marshall.....	126
Tabla 17. Resumen de Resultados.....	133
Tabla 18: Valores de mi recomendados para modificar los coeficientes de capas de base y sub-base granulares.....	145

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico N° 1: Análisis granulométrico de la mezcla de agregados (40% de agregado fino de Mulaló y el 60% de agregado grueso de Cashapamba).....	78
Gráfico N° 2: Curvas de diseño de la primera mezcla asfáltica (40% de agregado fino de Mulaló y el 60% de agregado grueso de Cashapamba) - Carpeta (faja 3/4") Método Marshall.....	91
Gráfico N° 3: Comparación de resultados de la estabilidad entre las mezclas modificadas y la convencional.....	127
Gráfico N° 4: Comparación de resultados del flujo entre las mezclas modificadas y la convencional.....	128
Gráfico N° 5: Comparación de resultados del ensayo de Tensión Indirecta entre las mezclas modificadas y la convencional.....	129
Gráfico N° 6: Comparación de resultados del ensayo de Módulo dinámico entre las mezclas modificadas y la convencional.....	131
Gráfico N° 7: Comparación de resultados del ensayo cántabro entre las mezclas modificadas y la convencional.....	132

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1: Planta de asfalto del Ing.: MARCO NARANJO.....	5
Fotografía 2: Stock Agregado Grueso Planta de asfalto del Ing. MARCO NARANJO...	25
Fotografía 3: Stock Agregado fino Planta de asfalto del Ing. MARCO NARANJO.....	26
Fotografía 4: Polímero Etileno Vinil Acetato (EVA).....	27
Fotografía 5: llevando la muestra a la temperatura constante de 135°C.....	38
Fotografía 6: Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol.....	39
Fotografía 7: Preparación de las Muestras.....	40

Fotografía 8: Penetración en las Muestras.....	41
Fotografía 9: Preparación de las probetas.....	42
Fotografía 10: Muestras Estiradas Antes de que se Rompan.....	43
Fotografía 11: Preparación de la Muestra en los Anillos de Bronce.....	45
Fotografía 12: Bajando todo el conjunto del aparato y muestras a 0°C.....	45
Fotografía 13: Punto de Ablandamiento (Método “Anillo y Bola”).....	46
Fotografía 14: Preparación del equipo y muestra.....	47
Fotografía 15: Ejecución del Ensayo.....	48
Fotografía 16: Peso de las Muestras.....	49
Fotografía 17.- Calentando las muestras en el horno.....	50
Fotografía 18: Agregando gasolina a la muestra.....	52
Fotografía 19: Muestra en baño de agua.....	52
Fotografía 20: Tomando muestra para dejar caer en el papel filtro.....	53
Fotografía 21: Pesando el conjunto picnómetro + asfalto.....	55
Fotografía 22: Baño de agua a 25°C conjunto picnómetro + asfalto +agua.....	56
Fotografía 23: Separando las partículas fracturadas y no fracturadas.....	60
Fotografía 24: Agitando la muestra.....	61
Fotografía 25: Adición de cloruro de calcio hasta 15".....	62
Fotografía 26: Tomando lectura de arcilla.....	63
Fotografía 27: Tomando lectura de arena.....	63
Fotografía 28: Colocando el material en la Maquina de los Ángeles.....	65
Fotografía 29: Separando el materia fino con tamiz No. 12.....	65
Fotografía 30: Preparando la muestra.....	67
Fotografía 31: Peso Especifico Aparente.....	68
Fotografía 32: Peso de la muestra en Estado SSS.....	69
Fotografía 33: Peso de la muestra sumergido.....	70
Fotografía 34: Cuarteo de Muestras.....	71
Fotografía 35: Pasando las partículas por el calibrador metálico.....	72
Fotografía 36: Cuarteo de muestras.....	74
Fotografía 37: Serie de tamices(a); movimientos circulares (b).....	75
Fotografía 38 : Preparación de la muestra	81
Fotografía 39: Fabricando briquetas mecánicamente.....	82

Fotografía 40: Extracción de las briquetas.....	82
Fotografía 41: Ensayo Marshall Diales de Estabilidad y Flujo.....	84
Fotografía 42: Ensayo Rice.....	86
Fotografía 43: Ensayo del contenido asfáltico.....	110
Fotografía 44: Material Cubierto Totalmente con Asfalto.....	112
Fotografía 45: Incremento de temperatura de 5°C por minuto.....	112
Fotografía 46: Estimación del porcentaje de asfalto que cubre las partículas.....	113
Fotografía 47: (a) Briqueta Marshall antes del ensayo, (b) después de ser sometida a Ensayo Cántabro.....	115
Fotografía 48: Ensayo Dinámico utilizando el equipo de tecnología COOPER TECHNOLOGY (CRT-HYD25-II Universal Servo Hydraulic Testing Machine).....	119
Fotografía 49: Montaje de Equipo para el ensayo de Tensión Indirecta.....	138
Fotografía 50: Aplicando carga hasta que falle la briqueta.....	138

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Proceso de refinación del petróleo para obtención del asfalto.....	7
Figura 2: Determinación de la viscosidad de Saybolt-furol.....	10
Figura 3: Ensayo normal de penetración.....	11
Figura 4: Ensayo punto de reblandecimiento método anillo y bola.....	11
Figura 5: Diagrama reológico Newtoniano.....	12
Figura 6: Ensayo de ductilidad.....	13
Figura 7: Ensayo de pérdida por calentamiento.....	15
Figura 8: Ensayo del punto de inflamación.....	15
Figura 9. Ensayo de la mancha, valoración visual.....	16
Figura 10. Representación de los Volúmenes en una Briqueta Compactada de Mezcla Asfáltica.....	29
Figura 11. (a) Configuración de Carga y (b) Rotura del Ensayo de Tracción indirecta	
Figura 12. Distribución de Tensiones Teórica sobre los Planos Diametral y Vertical para el Ensayo de Tracción Indirecta.....	35

Figura 13. Ventana 2.....	121
Figura 14. Ventana 3.....	121
Figura 15. Ventana 4.....	122
Figura 16. Ventana 5.....	122
Figura 17. Ventana 6.....	123
Figura 18. Ventana 7.....	123
Figura 19. Ventana 8.....	124
Figura 20. Ventana 9.....	124
Figura 21. Ventana 10.....	125
Figura 22. Ventana 11.....	125
Figura 23. Ventana 12.....	126
Figura24. Ventana 13.....	126
Figura 25. Ventana 14.....	127
Figura 26. Ventana 15.....	127
Figura 27. Ventana 16.....	128
Figura 28. Ventana 17.....	128
Figura 29. Ventana 18.....	129
Figura 30. Ventana 19.....	129
Figura 31. Funciones de Carga y Deformación Versus Tiempo.....	131
En la figura 32 se muestra la conformación de las capas para un pavimento flexible.....	169
Figura 33: Gráfica para hallar a_1 en función del módulo resiliente del concreto asfáltico.....	170
Figura 34: Variación de los Coeficientes “ a_2 ”, con diferentes parametros de resistencia de la Base Granular.....	171
Figura 35: Variación de los Coeficientes “ a_3 ”, con diferentes parametros de resistencia de la Sub-Base Granular.....	172
Figura 36: Nomograma de Diseño de Pavimentos Flexibles.....	173
Figura 37: Promedio de Factores de Carga Equivalente.....	174

RESUMEN TÉCNICO

COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO ETILENO VINIL ACETATO (EVA).

El presente trabajo de investigación, fue realizado con el fin de mejorar las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas mediante la incorporación del polímero Etileno Vinil Acetato (EVA)

Se realizaron ensayos para caracterizar las propiedades de los materiales utilizados, de acuerdo a procedimientos y especificaciones indicados con su respectiva norma, se efectuaron ensayos sobre las mezclas convencional y modificada como son Marshall, Cántabro, Tensión indirecta y Módulo Dinámico Elástico, siendo este el más representativo de la investigación ya que mide las deformaciones de las mezclas a diferentes temperaturas mediante tecnología moderna COOPER TECHNOLOGY (CRT-HYD25-II).

Los resultados obtenidos muestran mejoras significativas en las propiedades de la mezcla asfáltica lo cual permitió concluir que la incorporación del polímero EVA dentro de una mezcla convencional le da características de durabilidad e incrementa sus propiedades físico-mecánicas para disminuir el deterioro y daños viales producidos por cargas de tráfico.

DESCRIPTORES:

MEZCLAS ASFÁLTICAS/ POLÍMERO EVA/ ENSAYOS EN LIGANTE ASFÁLTICO/ AGREGADOS PETREOS / ANALISIS DE COSTOS.

ABSTRACT

BEHAVIOR OF A MIXTURE ASPHALTIC MODIFIED WITH POLYMER ETHYLENE VINYL ACETATE (EVA).

The present investigation was carried out in order to improve the physical-mechanical properties of asphalt mixtures through the incorporation of the polymer Ethylene Vinyl Acetate (EVA).

Tests were conducted to characterize the properties of materials used, according to procedures and specifications set out with their respective rule, were made tests on the mixtures conventional and amended as are Marshall, Cantabrian, Tension Indirect and Module Dynamic Elastic, this being the most representative of the investigation, as measured the deformations of the mixtures at different temperatures through modern technology COOPER TECHNOLOGY (CRT-HYD25-II).

The obtained results show significant improvements in the properties of the asphalt mixture which led it to conclude that the incorporation of the EVA polymer within a conventional mixture gives characteristics of durability and increases their physical-mechanical properties to decrease the deterioration and damage caused by road traffic loads.

DESCRIPTORS:

MIXTURE ASPHALTIC/ POLYMER EVA/ TEST IN THE ASPHALT/ AGGREGATES PETREOS/ ANALYSIS OF COSTS.

CAPITULO 1: GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES.

En la ciudad de Quito existe un gran deterioro de las principales vías de acceso y avenidas ,debido a que en la construcción de las mismas se utiliza mezclas asfálticas convencionales ,y a la falta de investigación para encontrar técnicas adecuadas que mejoren las propiedades físico/mecánicas de las mezclas asfálticas.

Otro problema es que con el aumento poblacional se ha ido aumentando también el tipo de tráfico, la cantidad de tráfico así como también la carga del vehículo, es decir mayor exigencia al pavimento por lo tanto los insumos que se tienen que utilizar en la construcción de estos pavimentos son también de mayor exigencia.

Si bien es cierto el cemento asfáltico ha sido el insumo principal en todas las tecnologías tales como son en caliente, en frío, en asfaltos emulsionados, es el elemento principal ante este panorama una de las técnicas actuales que se está utilizando en países como Chile, Argentina ,Brasil, consiste en perfeccionar el cemento asfaltico con polímeros ¹con la finalidad de mejorar ciertos aspectos tales como susceptibilidad térmica, comportamiento elástico resistencia a la fisuración por fatiga y resistencia al envejecimiento.

Actualmente en la localidad se están realizando investigaciones para conseguir aplicar este tipo de técnicas ya que dispone de todos los recursos necesarios para su obtención e implementación en los proyectos viales de nuestro país.

Debido a la gran cantidad de problemas existentes en las obras viales, que el ingeniero diseñador de mezclas asfálticas debe minimizar, las capas asfálticas deben aumentar la durabilidad y evitar el deterioro del pavimento.

Desde otro punto de vista existe la necesidad de mayores requerimientos de consistencia a las temperaturas, y por ende, de menor susceptibilidad térmica, para hacer la combinación de transito pesado y clima riguroso.

¹C.P.A (Comisión Permanente del Asfalto).Boletín 096.Jornadas Técnicas del Asfalto. Ciudad de la Plata Argentina.

1.2. INTRODUCCIÓN.

Tomando en cuenta que día a día las reservas de petróleo en el Ecuador y en el mundo tienden a disminuir, por consiguiente la obtención de sus derivados como lo es el asfalto, por ello nace la necesidad de buscar nuevos materiales que mejoren las mezclas asfálticas.

La tecnología de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas ha sido una técnica ampliamente estudiada y utilizada. Con la adición de polímeros al asfalto se modifican las propiedades mecánicas, químicas y reológicas de las mezclas asfálticas. Cuando se utiliza esta tecnología se pretende mejorar el comportamiento que experimentan las mezclas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente.

Siendo el objetivo principal del ingeniero diseñador de mezclas asfálticas mejorar el comportamiento estructural de los pavimentos y ofrecer comodidad y seguridad al usuario, se requiere buscar la forma de modificar las propiedades mecánicas de la carpeta asfáltica, lo que se consigue con la adición del polímero Etileno Vinil Acetato más conocido como EVA.

El grado de aporte de la incorporación del polímero EVA, en la mejora de las propiedades de las mezclas asfálticas, depende de factores dentro de las cuales podemos mencionar: la tecnología de la incorporación (vía seca o vía húmeda)², estructura química del polímero, y para el caso la incorporación por vía húmeda, el tiempo de digestión.

El propósito de esta investigación es contribuir al mejoramiento de las mezclas asfálticas con la adición del polímero EVA, que ayude a optimizar la calidad de la capa de rodadura.

El principal resultado a obtenerse es el diseño óptimo de una mezcla asfáltica con adición del polímero EVA con la utilización de agregados y asfaltos de buena calidad y una dosificación adecuada en el laboratorio.

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1.OBJETIVO GENERAL.

Disminuir el deterioro y daños viales con el diseño de una mezcla asfáltica modificada, con el polímero EVA.

² M. Ocampo, B.Caicedo & D.González. Mezclas Asfálticas Mejoradas con Polímeros .Bogotá D.C Universidad de Los Andes.

1.3.2.OBJETIVOS ESPECIFICOS.

1. Mejorar las características físico-mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales, utilizando el polímero EVA.
2. Determinar el porcentaje de polímero EVA para obtener la mezcla modificada óptima.
3. Evaluar los cambios en las propiedades físico-mecánicas de la mezcla convencional frente a la mezcla modificada.
4. Realizar un análisis económico comparativo, entre la mezcla convencional y la mezcla modificada, para su producción en planta.

1.4. JUSTIFICACIÓN.

“Es cada vez mayor el dilema: para lograr menores deformaciones y por consiguiente mayor rigidez, los porcentajes de asfalto en las mezclas deben disminuir, pero por otra parte para lograr menores fisuraciones los porcentajes deben aumentar”³

Esta investigación es importante, en razón de que es necesario estudiar y mejorar la preparación, cuanto también el uso y la durabilidad de los pavimentos, obteniendo mezclas resistentes a las deformaciones permanentes y fisuramientos , para lo cual se requiere la modificación de estas con la adición de elementos , como el polímero EVA que mediante una correcta dosificación presentaran mayores ventajas que los asfaltos convencionales de uso intensivo en nuestro medio y en las carreteras y caminos a nivel nacional ,además que por la gran demanda de viajes vehiculares ,las superficies se deterioran con mucha facilidad .

1.5. ALCANCE.

La presente investigación se va a realizar para que se pueda aplicar en la ciudad de Quito puesto que los agregados a utilizarse para la mezcla asfáltica en este proyecto son los mismos de la localidad ,para la aplicación en otros sectores se deberá realizar los respectivos ensayos y diseños de mezclas utilizando los materiales disponibles de cada zona.

Para el desarrollo y ejecución se utilizará las instalaciones del laboratorio de suelos y pavimentos de la EMMOP-Q ubicado al sur de la ciudad, donde se proporcionará el equipo necesario para realizar los ensayos. Los materiales para la mezcla provienen de la planta de asfalto del Ing. MARCO NARANJO, ubicada al oriente de la ciudad en el sector de Cashapamba, esta planta

³ C.P.A (Comisión Permanente del Asfalto).Boletín 096.Jornadas Técnicas del Asfalto. Ciudad de la Plata Argentina.

trabaja con el agregado fino de la mina de Mulaló, y con agregado grueso de la mina de Cashapamba. El polímero Etileno Vinil Acetato será proporcionado por la empresa BOBEMA NEDERLAN. B.V, ubicada en la ciudad de Quito.

El tiempo de duración de esta investigación es aproximadamente de seis meses, tiempo en el cual se va a obtener como resultado final el diseño de mezcla asfáltica modificada con el polímero EVA, por último se determinará el costo de producción en planta de esta mezcla modificada y se comparará con el costo de producción de las mezclas convencionales.

1.6. METODOLOGIA.

La investigación abarca desde la caracterización de los materiales, el diseño y estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas mejoradas con polímero Etileno Vinil Acetato, y la evaluación de las mejoras en la vida útil del pavimento. Para el mejoramiento de las mezclas asfálticas se estudiará la incorporación del polímero en el ligante asfáltico.

Para llegar a obtener la mezcla óptima se procederá de la siguiente manera:

1. Determinar las propiedades físicas y mecánicas del ligante asfáltico mediante los ensayos Viscosidad, Penetración, Punto de Reblandecimiento, Ductilidad, Pérdida por calentamiento, Punto de Inflamación, Ensayo de la Mancha y Peso Específico, los cuales serán realizados con sus respectivas normas.
2. Determinar las características y propiedades de los agregados a utilizarse realizando los ensayos como son: Porcentaje de Caras Fracturadas, Partículas Alargadas y Planas, Equivalente de Arena, Abrasión, Peso Específico, Absorción y Granulometría los mismos que serán realizados con sus respectivas normas.
3. Se diseñará una mezcla asfáltica convencional sin ninguna adición de polímero por el Método Marshall⁴, la cual servirá de base para las posteriores modificaciones y obtener el porcentaje óptimo de asfalto.
4. Luego se procederá a realizar el ensayo de peladura el mismo que nos permitirá evaluar si es o no necesario la utilización de algún aditivo de adherencia.
5. Una vez realizado este ensayo, se procederá a incorporar un cierto porcentaje de polímero EVA a diferentes mezclas.
6. En las mezclas obtenidas tanto convencional como modificadas se procederán a realizar los siguientes ensayos: Marshall, Extracción de Asfalto, Pérdida por desgaste (Método Cántabro), Dinámico Elástico, Tensión Indirecta los mismos que estarán regidos por sus respectivas normas.

⁴ Asphalt Institute Serie de Manuales No 22(MS-22).Principios de Construcción de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente.

7. Con los resultados en los ensayos realizados en las mezclas asfálticas se procederá a realizar un análisis, para determinar la mezcla óptima modificada, se revisará los cambios en las propiedades mecánicas de la mezcla modificada para compararlos con los de la mezcla convencional.
8. Por último se realizará un análisis económico comparativo entre la mezcla convencional y modificada para evaluar el costo de producción en planta por metro cúbico.

1.7. UBICACIÓN DE LA FUENTE DE MATERIALES A UTILIZARSE.

Los materiales componentes a utilizarse en el diseño de la mezcla asfáltica con adición del polímero EVA provienen de la planta de asfalto del Ing. MARCO NARANJO (ver Fotografía 1), que dispone de estos materiales, los agregados son de buena calidad los que se verificaran al realizar los ensayos correspondientes.

La planta de producción de mezcla asfáltica se encuentra en un sitio estratégico, que facilita el transporte de la mezcla hacia cualquier lugar de trabajo.



Fotografía 1: Planta de asfalto del Ing.: MARCO NARANJO.

CAPITULO 2: MARCO CONCEPTUAL.

2.1 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES.

2.1.1 EL ASFALTO

El asfalto es un material que puede ser encontrado en la naturaleza en yacimientos naturales o a través de la destilación del crudo de petróleo. Cuando se calienta lo suficiente, el asfalto se ablanda y se vuelve líquido, lo cual permite cubrir las partículas de agregado durante la producción de la mezcla en caliente que se va a producir en esta investigación.

El asfalto es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes.

En su constitución química el asfalto básicamente está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrogeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto, cuando es diluido en un solvente como el heptano, puede separarse en dos partes principales: asfaltenos y maltenos.

Los asfaltenos no se disuelven en el heptano. Los asfaltenos una vez separados de los maltenos, son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parece al polvo grueso de grafito. Los asfaltenos le dan al asfalto su color y dureza.

Los maltenos se disuelven en el heptano. Son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro. Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas. La proporción de los asfaltenos y maltenos en los asfaltos puede variar debido a un sin número de factores, incluyendo altas temperaturas, exposición a la luz y el oxígeno, tipo de agregado usado en la mezcla del pavimento y espesor de la película de asfalto en las partículas de agregado.

2.1.2 PRODUCCIÓN DEL ASFALTO

El asfalto se obtiene de la refinación por destilación del crudo de petróleo (ver Figura. 1). Es un proceso en el cual las diferentes fracciones (productos) son separadas fuera del crudo, por medio de un aumento en etapas de la temperatura. Existen dos procesos de destilación con los cuales puede ser producido después de haber combinado los crudos de petróleo:

- Destilación por vacío
- Extracción con solventes

Las fracciones livianas se separan por destilación simple. Los destilados más pesados, mejor conocidos como gasóleos, pueden ser separados solamente mediante una combinación de calor y vacío. Puede ser producido usando destilación por vacío a una temperatura aproximada de 480°C (900°F), esta puede variar un poco dependiendo del crudo de petróleo que se esté refinando, o del grado de asfalto que se esté produciendo. En el proceso de extracción con solventes, se remueven mas gasóleos del crudo, dejando así un asfalto residual.

Dependiendo del uso, es el tipo de asfalto. En las refinerías se deben tener maneras de controlar las propiedades de los asfaltos que se producen para poder cumplir con ciertos requisitos. Esto se logra la mayor parte de las veces, mezclando varios tipos de crudos de petróleo antes de procesarlos, para producir grados intermedios. Así un asfalto muy viscoso y uno menos viscoso, pueden ser combinados para obtener un asfalto con viscosidad intermedia.

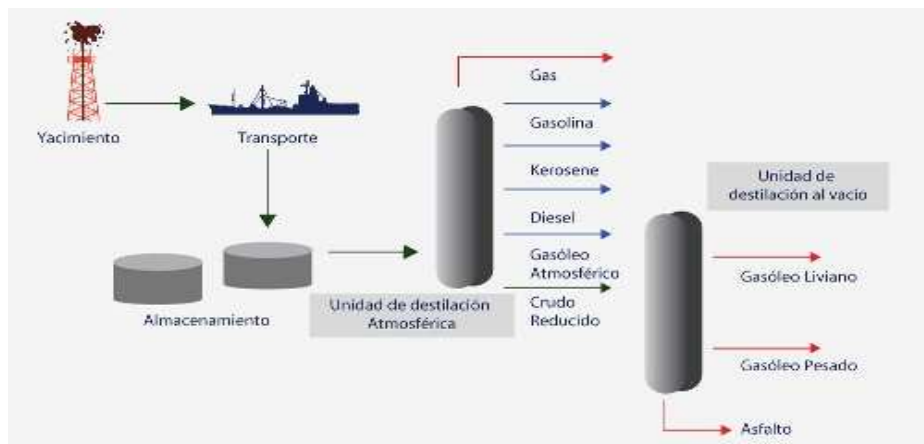


Figura 1: Proceso de refinación del petróleo para obtención del asfalto.

2.1.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS.

Las propiedades y características de los materiales asfálticos dependen de su estructura y composición química; pero dada su gran complejidad, estos materiales se caracterizan mediante ensayos empíricos para valorar las propiedades que tiene que poseer para emplearse como ligantes en obra de carreteras.

Las propiedades fundamentales que tiene que poseer los asfaltos para su empleo en carretera son:

- **Carácter termoplástico:** por acción de la temperatura su consistencia debe disminuir de manera que sean capaces de "mojar" y envolver los áridos. Al enfriarse debe adquirir la consistencia primitiva y dar cohesión a la mezcla.

- Buen comportamiento mecánico y reológico para resistir las tensiones impuestas por el tráfico y poder mantener a las temperaturas de servicio, la estructura de la mezcla asfáltica.
- Resistir al envejecimiento frente a los agentes atmosféricos y condiciones ambientales para conservar sus propiedades con el tiempo.

Es decir, que las propiedades fundamentales que deben poseer los asfaltos para emplearse en carreteras son: adhesividad a los áridos, buen comportamiento reológico y resistencia al envejecimiento.

2.1.3.1 ADHESIVIDAD A LOS ARIDOS

Para que el asfalto se adhiera a los áridos es necesario en primer lugar, que haya un buen contacto entre la superficie del árido y el asfalto, en segundo lugar, que existan fuerzas de atracción entre ambos.

La adhesividad árido-ligante es un fenómeno muy complejo que depende de la naturaleza tanto del árido como del asfalto, así como de las condiciones específicas de estos materiales en la obra (limpieza y contenido de humedad del árido, temperatura de mezclado, etc.).

Para valorar la adhesividad se emplean numerosos procedimientos lo que da idea de la complejidad del problema entre algunos de los ensayos los más significativos son, Ensayo de recubrimiento y peladura de asfalto en agregados, Ensayo Vialit, Ensayo de Inmersión-compresión, Ensayo en Pista con inmersión.

En esta investigación se realizara solo el ensayo más representativo que es el Ensayo de recubrimiento y peladura.

Ensayo de recubrimiento y peladura de asfalto en agregados.- Este ensayo describe el procedimiento que debe seguirse para valorar, en forma empírica, el efecto de la acción del agua sobre la película asfáltica que recubre un agregado, mediante un ensayo de adhesividad pasiva (stripping), que intenta poner de manifiesto la afinidad recíproca entre ambos materiales.

También, podrá utilizarse para juzgar un agregado con respecto a un ligante asfáltico tipo o para juzgar un asfalto con respecto a un agregado tipo. Así mismo, se puede emplear para valorar la acción de los aditivos que se utilicen para mejorar la adhesividad (cubrimiento).

Este ensayo consiste básicamente en realizar una mezcla con 100 gramos de agregado seco con un tamaño de 3/8 de pulgada y 5 gramos de asfalto, el material asfáltico se mezcla vigorosamente hasta que las partículas de agregado queden totalmente recubiertas. Se deja enfriar esta mezcla durante 1 o 2 horas aproximadamente a temperatura ambiente, luego de esto se la coloca en un vaso de vidrio con agua con capacidad de 500 cm³.

Se procede a hervir el agua con la mezcla con un incremento de temperatura de 5°C por minuto, una vez que hierva el agua dejamos que se mantenga así por 10 minutos.

El resultado de este ensayo es de caracterización visual de acuerdo a la cantidad de asfalto desprendido de las partículas de agregado. El procedimiento a seguir en la realización del ensayo se explica con detalle en el método ASTM D-3625.

En el presente estudio se utilizara este ensayo para ver si es necesario la adición de algún tipo de aditivo adherente.

2.1.3.2 COMPORTAMIENTO REOLOGICO

El comportamiento reológico de los asfaltos es de fundamental importancia para su empleo en carreteras, tanto para conseguir una correcta manipulación y puesta en obra, como para valor su comportamiento en servicio.

Los asfaltos presentan un comportamiento reológico muy complejo que depende de la temperatura, de carga y tiempo de aplicación .A bajas temperaturas y durante intervalos pequeños de tiempo el asfalto tiene un carácter elástico, mientras que a temperatura moderadamente elevadas o tiempos de aplicación muy largos, la elasticidad prácticamente desaparece, y el asfalto se deforma permanentemente y fluye .El mayor o menor grado de elasticidad depende de la composición y estructura coloidal .

Para caracterizar el complejo comportamiento reológico de los asfaltos se realizan ensayos empíricos de consistencia.

2.1.3.2.1 ENSAYOS EMPÍRICOS DE CONSISTENCIA

La caracterización de las propiedades reológicas de los asfaltos, se realizan habitualmente mediante una serie de ensayos empíricos de fácil ejecución .A continuación se expone muy brevemente los más usuales.

Viscosidad.- La finalidad del ensayo de viscosidad es determinar el estado de fluidez de los asfaltos a la temperatura que se emplea durante su aplicación. La viscosidad o consistencia del asfalto se mide en el ensayo de viscosidad Saybolt-Furol , se emplea un viscosímetro Saybolt con orificio furol . Se coloca en un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho una cantidad específica de asfalto .Como la temperatura a que se determina la viscosidad de los asfaltos son frecuente mente superior a los 100°C, el baño de temperatura constante del viscosímetro se llena con algún tipo de aceite. Cuando el asfalto a alcanzado una temperatura establecida, se quita el tapón y se mide el tiempo necesario en segundos para que pasen a través del orificio Furol 60 ml del material.

Cuanto más viscoso son los materiales más tiempo es necesario para que pasen a través del orificio. La figura 2 representa el procedimiento del ensayo. Los valores

obtenidos se expresan como segundos Saybolt-Furol (SSF). Los aparatos y procedimientos para la realización de este ensayo se describen detalladamente en el método ASTM E-102.

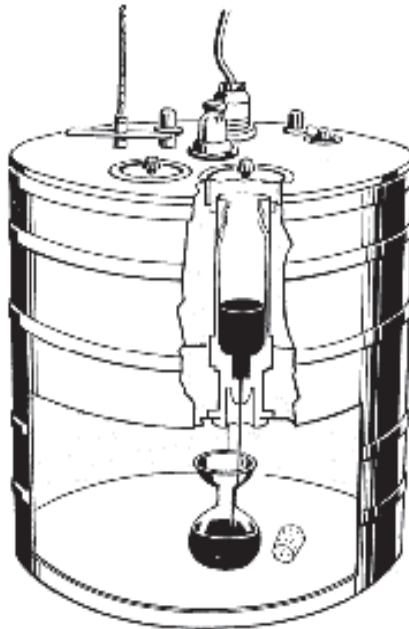


Figura 2: Determinación de la viscosidad de Saybolt-furol.

Penetración.- El ensayo de penetración determina la dureza o consistencia relativa de un asfalto, midiendo la distancia que una aguja normalizada penetra verticalmente en una muestra del asfalto en condiciones especificadas de temperatura, carga y tiempo. Cuando no se mencionan específicamente otras condiciones, se entiende que la medida de la penetración se hace a 25°C, que la aguja está cargada con 100 gr y que la carga se aplica durante 5 s (ver Figura 3) .La penetración determinada en estas condiciones se llama penetración normal .Es evidente que cuanto más blando sea el asfalto mayor será la cifra que indique su penetración .

Los asfaltos se clasifican en grados según su dureza o consistencia por medio de la penetración.

El Instituto de Asfalto ha adoptado cuatro grados de asfalto para pavimentación con penetraciones comprendidas dentro de los márgenes siguientes 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300 Además, el Instituto tiene especificaciones para un asfalto de penetración comprendida en el margen 40-50, que se usa en aplicaciones especiales e industrias. Los aparatos y procedimientos para realizar el ensayo de penetración se describen en el Método ASTM D-5.

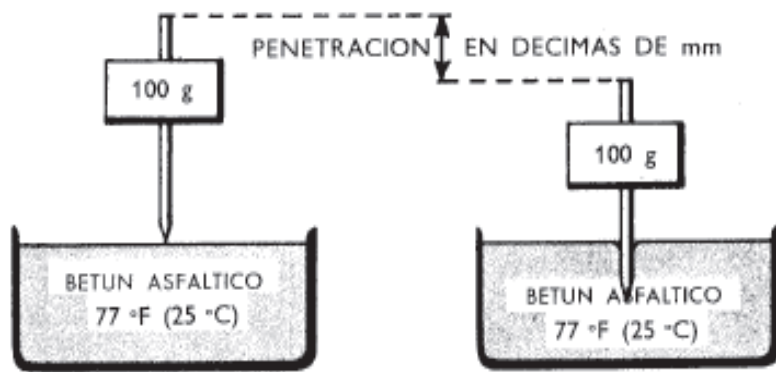


Figura 3: Ensayo normal de penetración.

Punto de reblandecimiento.- Los asfaltos de diferentes tipos reblandecen a temperaturas diferentes. El punto de reblandecimiento se determina usualmente por el método de ensayo arbitrario de anillo y bola. Aunque este ensayo no se incluye en las especificaciones para los asfaltos de pavimentos, se emplea frecuentemente para caracterizar los materiales más duros empleados en otras aplicaciones e indica la temperatura a que estos asfaltos se hacen fluidos. Consiste en llenar de asfalto fundido dos anillos de latón de dimensiones normalizadas. Las muestras así separadas se suspenden de un baño de agua destilada y sobre el centro de la muestra se sitúa una bola de acero de dimensiones y peso especificados (ver Figura 4). A continuación se calienta el baño a una velocidad de 5° C por minuto y se anota la temperatura en el momento en que la bola de acero caiga desde una distancia de 25 mm. Esta temperatura se llama punto de reblandecimiento del asfalto. Los procedimientos y aparatos necesarios para la realización del ensayo se describen con detalle en el método ASTM D-36.

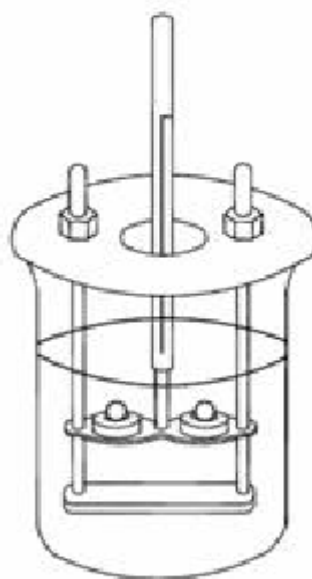


Figura 4: Ensayo punto de reblandecimiento método anillo y bola.

Índice de penetración .- Establecido por Pfeiffer y Van Doornal a partir de los valores de penetración a 25°C y del punto de reblandecimiento, es una medida de la susceptibilidad con la temperatura .Su valor da una indicación de la estructura coloidal y del comportamiento reológico .Asfaltos con índice de penetración bajos ($IP > -1$) presentan un comportamiento newtoniano (ver Figura 5) y son muy susceptibles a la temperatura mientras que los asfaltos con índices elevados ($IP > +1$) son poco susceptibles a la temperatura y presentan un comportamiento de flujo no newtoniano con cierta elasticidad y tixotropía .Los asfaltos empleados en carretera tienen índices de penetración comprendidos entre +1 y -1 y presentan características de flujo intermedias a los anteriores.

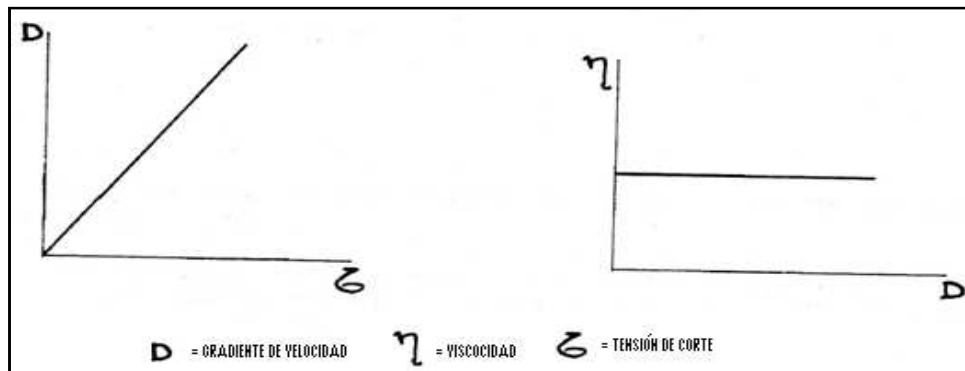


Figura 5: Diagrama reológico Newtoniano.

NOTAS:

(*) El índice de penetración (IP) se determina a partir del valor de la penetración en mm/10, a 25 °C, 100 gramos y 5 segundos (Pen) y del punto de ablandamiento, °C, por el método de anillo y bola (Tab) , según las expresiones siguientes:

$$A = 50 \cdot \left[\frac{\log 800 - \log \text{Pen}}{\text{Tab} - 25} \right] \quad IP = \frac{20 - 10 \cdot A}{A + 1}$$

(**) Deberá indicarse el tipo de solvente. Si se usan solventes con xileno debe especificarse el porcentaje a emplear.

Ductilidad.- Es una característica de los asfaltos importante en muchas aplicaciones .La presencia o ausencia de ductilidad, sin embargo, tiene usualmente mayor importancia que el grado de ductilidad existente. Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes que aquellos que les falta esta característica .Por otra parte ,los asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente más susceptibles a los cambios de temperatura .En algunas aplicaciones ,como las mezclas para pavimentación, tienen gran importancia la ductilidad y el poder

aglomerante, mientras que en otras , como la inyección bajo losas de hormigón y el relleno de grietas, la propiedad más esencial es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura .

La ductilidad del asfalto se mide en un ensayo de extensión del tipo representado en la figura 6. El ensayo consiste en moldear en condiciones y con dimensiones normalizadas una probeta de asfalto que después se somete a la temperatura normalizada del ensayo y se somete a alargamiento con una velocidad especificada hasta que el hilo que une los dos extremos rompe. La longitud (en cm) a la que el hilo de material se rompe define la ductilidad. Las condiciones normalizadas para este ensayo se determinan detalladamente en el método ASTM D-113.

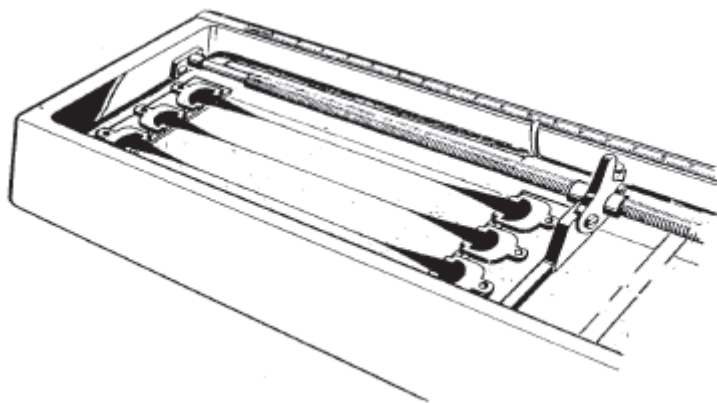


Figura 6: Ensayo de ductilidad

2.1.3.2.2 RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO

Envejecimiento es el nombre genérico dado a una serie de cambios en las propiedades de los materiales que ocurre durante periodos de tiempo más o menos largos, y que originan la degradación parcial o total de los mismos.

Los asfaltos presentan una gran resistencia al envejecimiento como consecuencia de su naturaleza fundamentalmente hidrocarbonado de baja reactividad; pero durante su manipulación y periodo de servicio están sometidos a una serie de factores y agentes externos que originan cambios en su composición y repercuten negativamente sobre sus propiedades.

En pavimentación, los asfaltos están sometidos a diferentes procesos de envejecimiento. En primer lugar hay que considerar el envejecimiento producido durante el transporte en las cisternas y el almacenamiento en los tanques de la planta ,donde el factor principal que causa el envejecimiento es la temperatura .Durante la fabricación de la mezcla asfáltica en caliente el ligante está sometido a altas temperaturas en presencia del oxígeno atmosférico, ,siendo por tanto la temperatura y el oxígeno los factores más importantes a considerar, aunque también hay una adsorción de algunas fracciones de asfalto por los áridos ,especialmente por el filler.

Finalmente, durante el periodo de servicio están expuestos a los agentes ambientales (radiación solar, oxígeno, agua, temperatura, microorganismos, etc.) y a contaminación por los lubricantes y carburantes que arrojan los vehículos a su paso por el firme.

El envejecimiento es un fenómeno físico químico muy complejo, que consiste fundamentalmente en una pérdida de los componentes más volátiles y en un proceso de oxidación; por tanto, depende de la composición y estructura química del asfalto y de otros parámetros inertes a la mezcla asfáltica (huecos de la mezcla, espesor de la película de asfalto, etc.), así como las condiciones ambientales (temperatura, radiación solar, humedad, etc.).

De forma general, el oxígeno atmosférico reacciona con los constituyentes más reactivos del betún, dando lugar a reacción de oxidación, deshidrogenación, condensación y polimerización, lo que provoca alteraciones en su composición química. Estas reacciones son activas por efecto de la temperatura, así como por efectos de la radiación solar; el agua de lluvia contribuye al envejecimiento al solubilizar algunos de los compuestos de oxidación.

Los cambios de composición química dan lugar a alteraciones en su estructura coloidal, ya que como consecuencia de estas reacciones se produce un aumento del contenido de asfaltenos, y una disminución del contenido de resinas y de los compuestos más aromáticos, lo que conduce a una gelificación progresiva del sistema coloidal.

Estas variaciones de composición química y estructura coloidal se traduce en un endurecimiento del asfalto (disminución de la penetración, aumento del punto de reblandecimiento A y B, aumento de la fragilidad, etc.), una pérdida del poder aglomerante.

El número de métodos existentes para valorar el envejecimiento de los asfaltos es muy elevado, posiblemente debido a la imposibilidad de recoger en un solo método la simulación de todos los procesos de manipulación a que están sometidos estos materiales desde su fabricación hasta su puesta en obra, así como el envejecimiento posterior producido su periodo de servicio.

A continuación se exponen los principios básicos de los métodos más representativos y de mayor uso, utilizados para envejecer de forma acelerada en el laboratorio de asfaltos.

Pérdida por calentamiento.- Con este ensayo se determina la pérdida por calentamiento del ligante asfáltico expresada en porcentaje de peso. Estos ensayos no son verdaderas pruebas, solamente son procedimientos que exponen una muestra de asfalto a unas condiciones que aproximan las ocurridas durante las operaciones de las plantas de mezclado en caliente.

Este ensayo consiste en colocar 50 gramos de ligante asfáltico en un recipiente de forma cilíndrica, fondo plano con un diámetro de 5.5cm y una altura de 3.5cm. Sometiendo a las muestras a una temperatura constante de $163^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 5 horas en un horno con base giratoria (ver Figura 7),

las revoluciones de la base serán de 5 a 6 rev/minuto. El procedimiento a seguir en la realización del ensayo se explica con detalle en el método ASTM D-6.

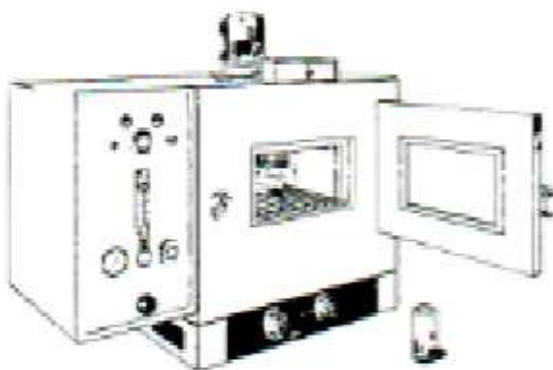


Figura 7: Ensayo de pérdida por calentamiento

Punto de inflamación.- El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

El punto de inflamación de un asfalto se mide por el ensayo en vaso abierto Cleveland .según condición normalizada prescrita en el método ASTM D-92. En la figura 8 se representa esquemáticamente el ensayo. Un vaso abierto de latón se llena parcialmente con asfalto y se calienta a una velocidad establecida .Se hace pasar periódicamente sobre la superficie de la muestra una pequeña llama, y se define punto de llama la temperatura a la que se han desprendido vapores suficientes para producir una llamarada repentina.

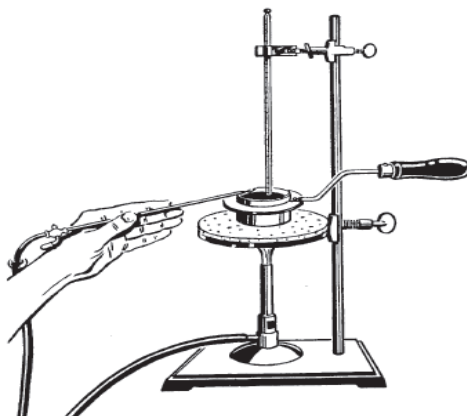


Figura 8: Ensayo del punto de inflamación.

Ensayo de la mancha.- El ensayo de la mancha o de "Oliensis" es un procedimiento que permite comprobar si un asfalto ha sido sometido a temperaturas capaces de originar procesos de descomposición térmica (cracking) o si ha sido contaminado con productos que los hayan tenido. Para la realización de este ensayo el solvente utilizado es gasolina. El resultado de esta prueba tiene una valoración visual (ver Figura 9). El procedimiento a seguir en la realización del ensayo se explica con detalle en el método AASHTO T-102.



Figura 9. Ensayo de la mancha, valoración visual.

Peso específico.- Aunque normalmente no se especifica, es deseable conocer el peso específico del asfalto que se emplea. Este conocimiento es útil para hacer las correcciones de volumen cuando este se mide a temperaturas elevadas. Se emplea también como uno de los factores para la determinación de los huecos en las mezclas asfálticas para pavimentación compactadas. El peso específico es la relación del peso de un volumen determinado del material al peso de igual volumen de agua, estando ambos materiales a temperaturas especificadas. Así, un peso especificado de 1.05 significa que el material pesa 1.05 veces lo que pesa el agua a temperatura fijada. Todos los líquidos y la mayor parte de los sólidos sufren cambios de volumen cuando varía la temperatura. Se expansionan cuando se calientan y se contraen cuando se enfrían. Para fijar condiciones determinadas aplicables a un valor dado del peso específico, debe indicarse la temperatura del material y la del agua. Así por ejemplo P.E. a 25/25 °C indica que la determinación se ha hecho con ambos materiales a una temperatura de 25° C. El peso específico del asfalto se determina normalmente por el método del picnómetro, descrito en los métodos ASTM D-70.

En Ecuador PETROECUADOR, produce cementos asfálticos en la refinería de Esmeraldas, que por sus características físicas de penetración (según el MTOP 60-70 u 85-100 mm/10) es utilizado como un asfalto AP-3. Los resultados de los ensayos antes indicados comparados con sus respectivas especificaciones de la Tabla 1, nos lleva a concluir si este asfalto es apto o no para tal uso.

ENSAYOS	60-70		85-100	
Betún original	MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO
Viscosidad a 135°C Saybolt-Furol,SSF	100	—	85	—
Penetración (25°C,100gr,5s)mm/10	60	70	85	100
Punto de ablandamiento A y B, °C	48	57	45	63
Índice de penetración(*)	-1.5	+1,5	-1.5	+1,5
Ductilidad (25°C,5 cm/min),cm	100	—	100	—
Contenido de agua(en volumen),%	—	0,2	—	0,2
Solubilidad en Tricloroetileno, %	99	—	99	—
Punto de inflamación, Copa Clevelan, °C	232	—	232	—
Densidad relativa, 25°C /25°C	1,00	—	1,00	—
Ensayo de la mancha(**)	NEGATIVO		NEGATIVO	
Contenido de parafinas, %	—	2,2	—	2,2

Tabla 1: Requisitos de los Cementos Asfálticos Según especificaciones del MTOP.

2.1.4 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El objetivo principal del diseño mezclas asfálticas de pavimentación, consiste en determinar una combinación y graduación económica de asfalto y agregados (dentro de los límites de las especificaciones del proyecto) que produzcan una mezcla con:

- Suficiente asfalto para proporcionar un pavimento durable.
- Buena estabilidad para satisfacer las demandas de tránsito sin producir deformaciones o desplazamientos.
- Suficiente trabajabilidad para evitar la segregación al momento de colocación.
- Un contenido de vacíos lo suficientemente alto, para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas producidas por el paso de vehículos sin que se produzca exudación.

El diseño de mezcla adecuado, es generalmente el más económico y que cumple satisfactoriamente los criterios mencionados anteriormente.

Se han desarrollado algunos métodos de proporcionamiento de asfalto y agregado para una mezcla asfáltica en caliente. Siendo los más conocidos los siguientes: Marshall, Hveem, Hubbard-Field y Triaxial de Smith.

En esta investigación se utilizara el método Marshall siendo un diseño de mezcla adecuado, generalmente el más económico y que cumple satisfactoriamente los criterios mencionados anteriormente.

2.1.4.1 MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL

El concepto de este método fue desarrollado por Bruce Marshall, ingeniero del estado de Mississippi. En su forma actual surgió de una investigación iniciada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. Su propósito es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente y establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento. El método Marshall solo se aplica a mezclas asfálticas (en caliente) de pavimentación, que usan cemento asfáltico clasificado por penetración o viscosidad y que contienen agregados con tamaño máximo de 25 mm (1 pulgada). Puede ser usado para el diseño en laboratorio o para el control de campo de pavimentos. Se deben utilizar probetas 64×102 mm de diámetro. Una serie de muestras, cada una con la misma combinación de agregados pero con diferente contenido de asfalto, son preparadas de acuerdo a procedimientos específicos.

Los dos datos más importantes del diseño de mezclas del método Marshall son:

- Análisis de la relación vacíos- densidad
- Prueba de estabilidad- flujo de las muestras compactadas.

A continuación se presenta la metodología seguida en el diseño realizado.

Caracterización de agregados

- Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821-95).
- Equivalente de arena (ASTM D-2419).
- Abrasión de agregado grueso maquina de los Ángeles (ASTM-131).
- Determinación del peso específico del agregado fino (ASTM D-128).
- Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM D-127).
- Análisis granulométrico (ASTM D-422).
- Partículas planas y alargadas (ASTM D-4791).

Caracterización de asfaltos

Trabajado de acuerdo a lo indicado en la tabla 1.

Elaboración de probetas de ensayo.

Cada una contiene una diferente cantidad de asfalto, las muestras son preparadas de la siguiente manera:

- El asfalto y los agregados se calientan y se mezclan hasta que todas las partículas estén revestidas de asfalto. Para simular el proceso de calentamiento y mezclado que ocurre en la planta.
- Luego de haber mezclado, es colocada en los moldes Marshall para después compactarlas con el martillo.
- Las probetas son compactadas mediante golpes del martillo. El número de golpes que se darán para este caso en esta investigación será de 75 ya que se trata de modificar una mezcla asfáltica para tráfico pesado. Luego de esto, se deja enfriar las briquetas y posteriormente son extraídas de los moldes.
- Después de que las probetas han sido preparadas se procede a determinar el peso específico total, medir la estabilidad, la fluencia Marshall, analizar la densidad y el contenido de vacíos de cada una.

2.1.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES GRANULARES

Agregado mineral: Conocido como roca, material granular o agregado mineral es cualquier material duro e inerte utilizado en forma de partículas graduadas o fragmentos, como parte de un pavimento asfáltico. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada, escoria y polvo de roca.

2.1.5.1 AGREGADO GRUESO

Porcentaje de caras fracturadas en los agregados (ASTM D 5821-95). El propósito de este ensayo es de maximizar la resistencia al esfuerzo cortante con el incremento de la fricción entre las partículas. Otro propósito es dar estabilidad a los agregados empleados para carpeta o afirmado; y dar fricción y textura a agregados empleados en pavimentación.

La forma de las partículas de los agregados puede afectar la trabajabilidad durante su colocación; así como la cantidad de fuerza necesaria para compactarla a la densidad requerida y la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida de servicio.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento en el pavimento, debido a que se entrelazan al ser compactadas. El mejor entrelazamiento se da, generalmente, con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre por trituración.

Este ensayo describe la determinación del porcentaje, en peso, de una muestra de agregado grueso que presenta una, dos o más caras fracturadas.

El número especificado de caras fracturadas, se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

Ecuación N°1: Porcentaje de partículas con el número especificado de caras fracturadas.

$$P = \left[\frac{F + Q/2}{F + Q + N} \right] * 100$$

Donde:

P = Porcentaje de partículas con el número especificado de caras fracturadas.

F =Peso o cantidad de partículas fracturadas con al menos el número especificado de caras fracturadas.

Q =Peso o cantidad de partículas cuestionables.

N =Peso o cantidad de partículas en la categoría de no fracturadas que no cumplen el criterio de fractura.

Abrasión de agregado grueso maquina de los Ángeles (ASTM-131). El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la máquina de Los Ángeles.

Los agregados deben ser capaces de resistir el desgaste irreversible y degradación durante la producción, colocación y compactación de las obras de pavimentación, y sobre todo durante la vida de servicio del pavimento.

Por otro lado, los agregados transmiten los esfuerzos a través de los puntos de contacto donde actúan presiones altas. El Ensayo de Desgaste de Los Ángeles,

ASTM C-131 ó AASHTO T-96 y ASTM C-535, mide básicamente la resistencia de los puntos de contacto de un agregado al desgaste y/o a la abrasión.

El resultado del ensayo se expresa en porcentaje de desgaste, calculándose como la diferencia entre el peso inicial y final de la muestra de ensayo con respecto al peso inicial.

Ecuación N°2: Porcentaje de Desgaste.

$$\%deDesgaste = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{inicial}} * 100$$

Entre menor sea el porcentaje de desgaste obtenido en el ensayo, mayor será la resistencia de los materiales para soportar la abrasión producida por efecto de las cargas del tránsito vehicular.

El desgaste máximo permisible es de 35%. De acuerdo a la graduación del material existen 4 tipos de abrasión (ver Tabla 2).

TIPO	RETENIDO	PESO (gr.)	No. DE ESFERAS	REVOLUCIONES	TIEMPO (min.)
A	1", 3/4", 1/2" y 3/8"	1250 ±10	12	500	17
B	1/2" y 3/8"	2500 ±10	11	500	17
C	1/4" y # 4	2500 ±10	8	500	17
D	# 8	2500 ±10	6	500	17

Tabla 2: Tipos de abrasión

Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso (ASTM D-127).

El ensayo tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico “bulk”, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado grueso cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

Las cantidades mínimas para ensayo se indican en la Tabla 3, en función del tamaño máximo nominal del agregado.

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima de muestra
mm	(pulg)	kg
hasta 12.5	1/2	2
19.0	3/4	3
25.0	1	4
37.5	1 1/2	5
50.0	2	8
63.0	2 1/2	12
75.0	3	18
90.0	3 1/2	25

Tabla 3: Cantidades mínimas para ensayo según el tamaño nominal.

Las ecuaciones utilizadas para calcular el peso específico y la absorción :

Ecuación N°3: Peso Específico “Bulk”.

$$PE_{bulk} = \frac{A}{B - C}$$

Ecuación N°4: Peso Específico Aparente.

$$PE_a = \frac{A}{A - C}$$

Ecuación N°5: Peso Específico Saturado.

$$PE_s = \frac{B}{B - C}$$

Ecuación N°6: Porcentaje de Absorción.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{B - A}{A}$$

Donde:

A = Peso del material seco en horno.

B = Peso del material saturado con superficie seca.

C = Peso del material en el agua.

Partículas planas y alargadas (ASTM D-4791).- Las partículas planas y alargadas son definidas respectivamente, como aquellas partículas cuya dimensión última es menor que 0.6 veces su dimensión promedio y aquellas que son mayores 1.8 veces la dimensión promedio. Para el propósito de esta prueba, la dimensión promedio se define como el tamaño medio entre las dos aberturas 1” a ¾”, ¾” a ½”, ½” a 3/8”, etc. entre las que los agregados son retenidos al ser tamizados.

Después de haber sido cribados por la malla de abertura cuadrada y de dos mallas respectivamente, las partículas planas pueden ser separadas rápidamente pasándolas por cribas con ranuras, pero en este caso, se necesita un tipo de criba para cada tamaño. El porcentaje por peso de las partículas planas y alargadas se le designa con el nombre de índice de aplanamiento e índice de alargamiento.

Ecuación N°7: Índice de Aplanamiento.

$$IAP(\%) = \frac{P_i}{W_i} * 100$$

Ecuación N°8: Índice de Alargamiento.

$$IAL = \frac{R_i}{W_i} * 100$$

Donde:

Pi = Peso de las partículas que pasan por la ranura correspondiente.

Wi = Peso inicial de esa fracción.

Ri = Peso de las partículas que se retienen en la ranura correspondiente.

El valor correspondiente al índice de alargamiento e índice de aplanamiento se redondeara al inmediato entero superior.

2.1.5.2 AGREGADO FINO

Equivalente de arena (ASTM D-2419). Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm). El término “Equivalente de Arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución de cloruro de calcio (Ca Cl₂) en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta. El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Determinación del peso específico del agregado fino (ASTM D-128). Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

El peso específico aparente es la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente.

El procedimiento para realizar este ensayo es el descrito en la norma ASTM D-128.

Las ecuaciones utilizadas para calcular el peso específico y la absorción:

Ecuación N°9: Peso específico Aparente.

$$PE = \frac{A}{A + B - C}$$

Ecuación N°10: Absorción.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{500 - A}{A}$$

Donde:

PE = Peso específico.

A = Peso del material seco en horno.

B = Peso del matraz lleno con agua a 20 °C.

C = Peso del matraz + agregado + agua a 20°C.

Análisis granulométrico (ASTM D-422). El análisis granulométrico tiene como objeto, que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en la mezcla de pavimentación en ciertos porcentajes.

Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada graduación del agregado o graduación de la mezcla.

El método utilizado para determinar la graduación de los agregados es por tamizado seco, el mismo que tiene las siguientes características:

- Las muestras para el tamizado son reducidas por medio de un “cuarteador” de muestras.
- Los materiales finos y gruesos son separados utilizando un tamiz de 2.36 mm (N°8).
- Las muestras son secadas en el horno hasta un peso constante.
- Las muestras finas y las muestras gruesas son tamizadas separadamente.
- El peso de las fracciones (porciones) retenidas en cada tamiz, y el platón que esta al final de los tamices, es registrado, así como la graduación de cada muestra (parte fina y parte gruesa).

Para la elaboración de la mezcla asfáltica de investigación se va a trabajar con los agregados de la planta de asfalto del Ing. MARCO NARANJO (ver Fotografía 2 y 3). Los agregados son de tipo

A⁵, los mismos que serán sometidos a las exigencias de calidad requeridas en las especificaciones del MTOP. La granulometría a utilizarse está expuesta de acuerdo a la Tabla 4.

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	Nº4
1" (25.4 mm.)	100	—	—	—
¾" (19.0 mm.)	90-100	100	—	—
½" (12.7 mm.)	—	90-100	100	—
3/8" (9.50 mm.)	56-80	—	90-100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35-65	44-74	55-85	80-100
Nº 8 (2.36 mm.)	23-49	28-58	32-67	65-100
Nº 16 (2.36 mm.)	—	—	—	40-80
Nº 30 (0.60 mm.)	—	—	—	25-65
Nº 50 (0.30 mm.)	5-19	5-21	7-23	7-40
Nº 100 (0.15 mm.)	—	—	—	3-20
Nº 200 (0.075 mm.)	2-8	2-10	2-10	2-10

Tabla 4: Requisitos Granulométricos para mezclas asfálticas en Planta Según especificaciones del MTOP.



Fotografía 2. Stock Agregado Grueso Planta de asfalto del Ing. MARCO NARANJO.

⁵ MOP-001-F-2002.Tomo II. Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes



Fotografía 3. Stock Agregado fino Planta de asfalto del Ing. MARCO NARANJO.

2.1.6 EL POLÍMERO.

Los polímeros son sustancias de alto peso molecular formada por la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas llamados monómeros (compuestos químicos con moléculas simples). Se forman así moléculas gigantes que toman formas diversas: cadenas en forma de escalera, cadenas unidas o termo fijas que no pueden ablandarse al ser calentadas, cadenas largas y sueltas.

Hoy en día, el uso de los polímeros se ha expandido a varias aplicaciones debido a su baja densidad, alta resistencia a la corrosión, alta resistencia mecánica y otras propiedades importantes.

La utilización comercial de un nuevo producto como el caso de los polímeros depende del costo y sus propiedades. El costo, depende básicamente de su proceso de polimerización y la disponibilidad de los monómeros. Así, las principales fuentes de materia prima para la producción de monómeros son:

- Productos Naturales.
- Hulla o Carbón Mineral.
- Petróleo

Producción de los polímeros

Los polímeros al igual que muchos materiales se obtienen a partir de materia prima en plantas especializadas. El proceso para producir un polímero es llamado polimerización, existen dos tipos:

Polimerización en cadena: el material inicial para la polimerización en cadena con frecuencia es un monómero, en el que hay un enlace doble que se puede abrir con la ayuda de un compuesto llamado iniciador (sustancia orgánica o inorgánica o también puede ser un catalizador que no se consume en la reacción). Se lleva a cabo utilizando temperatura elevada y presión baja, este proceso es conocido también como polimerización por adición. Las estructuras más frecuentes para llevar a cabo este tipo de reacción son los hidrocarburos, en los que el carbono y el hidrogeno pueden formar cadenas rectas (hidrocarburos alifáticos) y anillos de benceno (hidrocarburos aromáticos).

Polímeros de reacciones por pasos: en este caso se unen dos monómeros en grupos cortos que crecen gradualmente, pero también se libera un derivado de bajo peso molecular, por ello se le llama también reacción por condensación. En estos polímeros, la longitud promedio de la partícula es controlada cuando se lleva a cabo la reacción, esto significa que el grado de polimerización o número de meros es controlado.

Polímeros utilizados en la modificación de asfaltos

Actualmente los cementos asfálticos son modificados con elastómeros, SBR y SBS, o con plastómeros (EVA), los nombres completos para estos compuestos son los siguientes: Etileno-Vinil-Acetato (EVA), Estireno- Butadieno- Latex (SBR) y Estireno-Butadieno-Estireno (SBS).

Para el desarrollo de este proyecto se utilizara cómo polímero de adición a la mezcla el Etileno vinil Acetato (Fotografía 4.) proporcionado por la empresa BOBEMA NEDERLAND B.



Fotografía 4. Polímero Etileno Vinil Acetato (EVA).

Una de las principales características que presenta el cemento asfáltico modificado con el polímero EVA es el aumento en la viscosidad de la mezclas resultante, haciéndola la flexible a bajas temperaturas y menos plástica a altas .Entre los principales beneficios en los pavimentos están las mejoras a la deformación permanente, a la fatiga y la resistencia al fisuramiento a bajas temperaturas.

El proceso que se utilizara para la incorporación del polímero EVA en la mezcla asfáltica será por medio del proceso húmedo, en el cual el polímero actúa modificando el cemento asfáltico.

2.2 COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Una muestra de mezcla de pavimento preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento .El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla (ver figura 10), y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla.
- Vacíos de aire, o simplemente vacíos.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto.

Densidad. La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de mezcla).La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado, para obtener un rendimiento duradero.

En las pruebas y el análisis de diseño de mezclas, la densidad de la muestra compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) o libras por pie cúbico (Lb/ft^3).

La densidad se calcula al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000Kg/m^3 ó 62.416Lb/ft^3).La densidad obtenida en el laboratorio se convierte en la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no adecuado. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que muy rara vez la compactación in-situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación del laboratorio.

Vacios de aire,(o simplemente vacíos).Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada. Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios a donde pueda fluir

el asfalto durante esta compactación adicional. El porcentaje permitido de vacíos (en muestra de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico.

La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menos va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie.

La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad, menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor posible (en la realidad) de vacíos; preferiblemente menos del 8 por ciento.

Vacíos en el agregado mineral. Los vacíos en el mineral (VAM) son los espacios de aire que existen entre las partículas del agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VAM representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde, por absorción en el agregado)

Y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VMA, mas espacio Habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VAM los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durable será la mezcla.



Figura 10. Representación de los Volúmenes en una Briqueta Compactada de Mezcla Asfáltica.

Para que pueda lograrse un espesor durable de película de asfalto, se debe tener valores mínimos de VAM. Un aumento en la densidad de la graduación del agregado, hasta el punto donde se obtengan valores VAM por debajo del mínimo especificado, puede resultar en películas delgadas de asfalto y en mezclas de baja durabilidad y apariencia seca. Por lo tanto, es contra prudente y perjudicial, para la calidad del pavimento, disminuir el VAM para economizar en el contenido de asfalto.

Contenido de asfalto. La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlar con precisión en la obra. El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios dictados por el método de diseño seleccionado.

El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado, tales como la granulometría y la capacidad de absorción.

La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir uniformemente todas las partículas. Por otro lado, las mezclas más gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral. Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber literalmente gran parte del contenido de asfalto resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario; poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda).

Cualquier variación en el contenido de relleno mineral, causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado relleno mineral cualquier ajuste arbitrario para corregir la situación, probablemente la empeora. En vez de hacer ajustes arbitrarios, se deberá efectuar un muestreo en unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y si es necesario establecer otro diseño de mezcla.

La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado utilizado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se pueda cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto.

Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido; contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto.

El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado, es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados.

El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.

La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregado, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas.

2.2.1 MEZCLAS MODIFICADAS.

La modificación de asfalto es una nueva técnica utilizada para el aprovechamiento efectivo de asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de polímeros a los asfaltos convencionales con el fin de mejorar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones por factores climatológicos y del tránsito.

Los agentes modificadores utilizados en los asfaltos, mejoran el comportamiento reológico de los mismos. Se puede decir que un asfalto modificado es un ligante hidrocarbonado resultante de la interacción física y/o química de los polímeros con un ligante asfáltico.

Un asfalto puede modificarse con rellenos minerales, cauchos, plásticos o hidrocarburos. Los asfaltos se caracterizan por variar su comportamiento según la temperatura a la que se encuentren; es por ello que a distintas temperaturas el asfalto posee distintas consistencias, propiedad que se denomina susceptibilidad térmica, la cual debería ser lo más baja posible, de modo que a bajas temperaturas y tiempos cortos de aplicación de cargas, sean lo suficientemente flexibles para evitar el fisuramiento y a tiempos prolongados de aplicación de cargas, sean resistentes a las deformaciones.

La situación ideal es aquella de aquel asfalto que mantiene su consistencia en un amplio intervalo de temperatura.

Los polímeros son sustancias orgánicas de alto peso molecular que logran hidratarse e hincharse dentro del asfalto. Así por ejemplo tenemos los cauchos, de comportamiento elastomérico. Algunos polímeros generan cadenas lineales, otros en bloque pero en general la macrodispersión lograda consta de un sistema de dos fases en donde

- El polímero se dispersa sin ejercer efecto alguno.
- Absorben los aceites maltenos y se hinchan.

Se dispersan en forma molecular. El grado de dispersión depende de la temperatura de trabajo, del esfuerzo de corte ejercido, de la aromaticidad de los maltenos del asfalto base y de la cantidad de asfaltos presentes.

En general un agente modificador logra:

- Disminuir la susceptibilidad térmica.
- Aumentar la cohesión interna.
- Mejorar la elasticidad y flexibilidad a bajas temperaturas.
- Mejorar el comportamiento a fatiga.
- Aumentar la resistencia al envejecimiento.

Los asfaltos modificados quedan así constituidos por dos fases diferenciadas:

1) Polímero

2) Ligante Asfáltico.

Cuando hay bajas concentraciones de polímeros existe una matriz continua de ligante asfáltico en la que se encuentra disperso el polímero, a altas concentraciones de ligante asfáltico se invierten las fases. Esta estructura da origen al cambio de comportamiento de los asfaltos modificados.

Los ensayos que se realizan a un asfalto modificado sirven para evaluar:

- Elasticidad.
- Propiedades mecánicas.
- Compatibilidad.
- Estabilidad del almacenamiento.
- Envejecimiento.

2.3 ENSAYOS DINÁMICOS.

Estos ensayos evalúan las características dinámicas de las mezclas, su estabilidad remanente y su comportamiento a la tracción indirecta para tener una idea del comportamiento del sistema ante las cargas repetitivas.

2.3.1 MÓDULO DINÁMICO ELÁSTICO.

Módulo Dinámico.- Es el valor absoluto del Módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal $|E^*|$.

Módulo Complejo.- Es un número complejo que define la relación entre esfuerzo y deformación para un material viscoelástico lineal, E^* .

Material lineal.- Es un material cuya relación esfuerzo deformación es independiente del esfuerzo de carga aplicada.

Los módulos dinámicos se usan para establecer la rigidez de la mezcla asfáltica. Las leyes de fatiga permiten determinar su vida remanente.⁶

La rigidez describe la relación esfuerzo – deformación en las mezclas asfálticas en términos de rigidez y de las propiedades del agregado. El módulo de rigidez es la información mediante la cual se determina cuanto se deforma el material bajo la acción de una carga dada, por tal motivo se puede considerar como una de las propiedades fundamentales a la hora de hacer un diseño de mezclas asfálticas.

El módulo está relacionado al fisuramiento por fatiga, a la deformación permanente (Ahuellamiento) y a la capacidad de propagación de las cargas. Además, depende básicamente de la temperatura y de la velocidad a la cual se aplica el esfuerzo.

El factor más influyente en el módulo dinámico a temperaturas bajas y en cortos tiempos de aplicación de la carga, es el asfalto; pero por otro lado, para altas temperaturas y largos tiempos de aplicación de carga son:

1. La forma del agregado.
2. La graduación del material.
3. El grado de compactación de la mezcla.

El módulo dinámico es un dato muy importante, que puede emplearse tanto para el diseño de la mezcla asfáltica para pavimento como para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico. Este módulo se puede determinar en un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencia de carga. El equipo utilizado para determinar el valor del módulo dinámico será mediante tecnología moderna COOPER TECHNOLOGY (CRT-HYD25-II). En esta investigación este

⁶ ASOPAC (Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia). Cartilla del Pavimento Asfáltico.

ensayo se lo realizara sobre la mezcla convencional y modificada, a las temperaturas de 10°, 20° y 40°C a la misma frecuencia de carga.

2.4 TENSION INDIRECTA.

La determinación de la resistencia a Tensión Indirecta en las mezclas asfálticas representa un parámetro mecánico, que puede resultar una herramienta sumamente útil para evaluar la calidad del proceso constructivo de la capa asfáltica, valorando la cohesión de la mezcla, además permitirá complementar los conocimientos adquiridos con los diseños convencionales y analizar nuevos diseños. El ensayo⁷ de tracción indirecta reproduce el estado de tensiones en la fibra inferior de la capa de asfalto o zona de tracción. Es un método práctico y sencillo para caracterizar las propiedades de las mezclas asfálticas o evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción.

El ensayo consiste en cargar una probeta cilíndrica, igual a la definida para el ensayo Marshall, con una carga de compresión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas figura 11 (a). Esta configuración de carga, que puede ser sencilla o repetida, provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura en el plano diametral figura 11 (b).

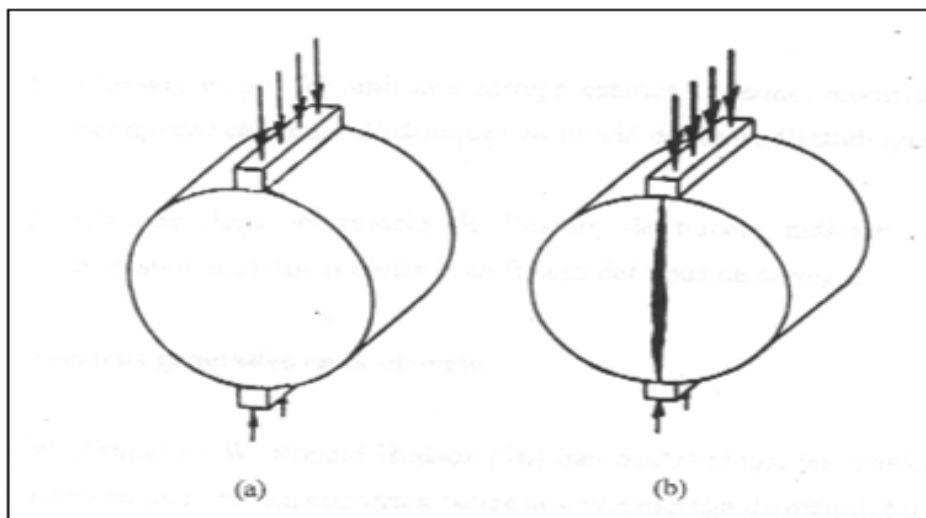


Figura 11. (a) Configuración de Carga y (b) Rotura del Ensayo de Tracción indirecta.

En el ensayo estático, la carga se aplica a una velocidad relativamente baja, generalmente 50,8 mm por minuto, aunque puedan usarse velocidades más lentas aún, situación conveniente a temperaturas más bajas, considerando que el material se comporta más elásticamente y que la deformación asociada con la fisuración térmica se desarrolla lentamente.

⁷ Carlos Wahr. Control de Calidad de Mezclas.

En una probeta cilíndrica sometida a una carga diametral, tal y como sucede en el ensayo de tracción indirecta, la distribución teórica de tensiones a lo largo de los ejes horizontales y verticales para una carga concentrada se muestra en la figura 12.

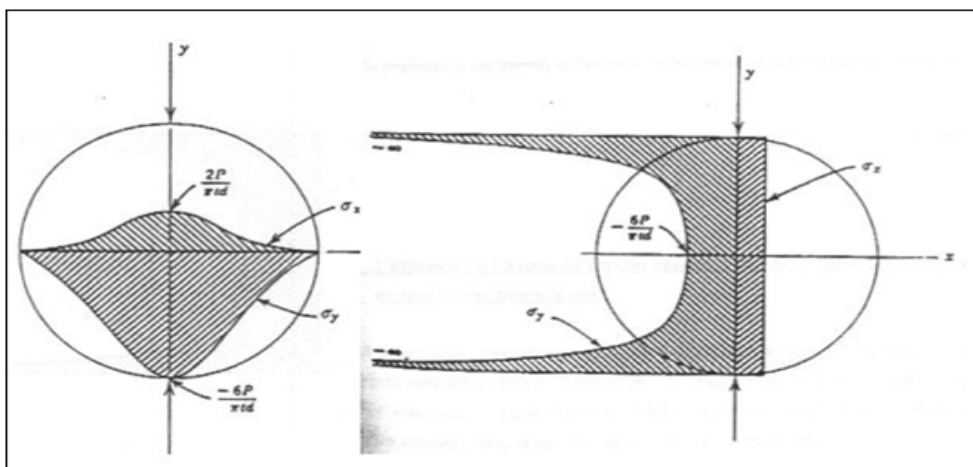


Figura 12. Distribución de Tensiones Teórica sobre los Planos Diametral y Vertical para el Ensayo de Tracción Indirecta.

La temperatura del ensayo puede variar, siempre que se respeten los límites de validez de las ecuaciones. Las deformaciones horizontales y verticales deben registrarse continuamente durante la carga si se pretende calcular la relación de Poisson y el módulo de elasticidad estático. Es posible evaluar la resistencia a la fisuración térmica fácilmente a partir de este ensayo, considerando su corta duración.

El parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta. También se puede determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante la relación del ensayo si se dispone de los sistemas necesarios para medirlos. El procedimiento se usa tanto para probetas fabricadas en laboratorio como para las extraídas del pavimento.

El ensayo da información sobre propiedades elásticas resilientes, de fisuración térmica, de fisuración por fatiga, de deformación permanente y puede utilizarse para evaluar el efecto de la humedad en la mezcla bituminosa.

En nuestra investigación el ensayo de tensión indirecta se lo realizará con la finalidad de determinar el esfuerzo de tensión horizontal que resistan las briquetas tanto las fabricadas con mezcla convencional como modificada.

2.5 ENSAYO CÁNTABRO O DE PÉRDIDA POR DESGASTE.

El ensayo Cántabro permite evaluar indirectamente, empleando la Máquina de Los Ángeles la cohesión, trabazón así como la resistencia a la disgregación de mezclas asfálticas con áridos de tamaño máximo inferior a 25 mm, ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tránsito.

El ensayo Cántabro (Ensayo de pérdida por desgaste), muestra claramente hasta qué punto los ligantes modificados con polímeros pueden mejorar las prestaciones de los asfaltos.

El ensayo Cántabro puede realizarse tanto en estado Seco como en Húmedo, simulando en laboratorio la acción abrasiva del tránsito y la influencia del agua, lo que permite el estudio y dosificación de este.

Cántabro Seco: El procedimiento puede emplearse tanto en el proyecto de mezclas como en laboratorio para el control en obra. Se aplica a las mezclas bituminosas fabricadas en caliente y de granulometría abierta cuyo tamaño es inferior a 25mm. El ensayo es realizado a una temperatura de 25°C.

Cántabro húmedo: El ensayo cántabro húmedo nos permite valorar la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua en la mezcla y por el efecto que produce el empleo de ligantes modificados en la mejora de esa propiedad.

En el presente estudio se realizara el ensayo cántabro mediante el procedimiento seco, el mismo que servirá como base para lograr determinar el porcentaje optimo de polímero en la mezcla.

CAPITULO 3: ENSAYOS EN LIGANTE ASFÁLTICO.

Para caracterizar y evaluar la calidad del ligante asfáltico existen diversos ensayos tradicionales que tratan de reproducir el comportamiento a escala real del material, la importancia del conocimiento de los requisitos y exigencias de calidad del ligante asfáltico tanto por parte del productor, comercializador, transportista, contratista y fiscalizador es de rigor necesario y está supeditado al procedimiento para la aceptación de un ligante asfáltico en trabajos de pavimentación.

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos y se enuncia la norma que los rige. Los resultados obtenidos y la comparación con las especificaciones del MOPT en cada ensayo pueden observarse en la Tabla 5.

3.1 ENSAYO DE VISCOSIDAD SAYBOLT-FUROL (ASTM E-102).

Este ensayo se emplea normalmente para cementos asfálticos, emulsiones y aceites y sirve para determinar el tiempo en segundos, necesarios para que pasen 60 centímetros cúbicos de líquido, a una temperatura determinada, a través de un tubo de dimensiones específicas.

En esta investigación al tratarse de un cemento asfáltico se determinara a una temperatura de 135 °C.

Equipo

- Viscosímetro Saybolt.
- Frasco calibrado para recibir la muestra de 60 cm³.
- Termómetros.
- Cronómetro A \pm 1s.
- Pipeta de 2mm de diámetro interior.

Procedimiento.

Se comienza el ensayo limpiando perfectamente el recipiente con un disolvente eficaz, por ejemplo, gasolina, teniendo cuidado de que no quede disolvente en el interior del cilindro.

Se hace pasar la muestra a través de un tamiz # 100 antes de echarla en el recipiente. Se echa en el recipiente ya limpio una cantidad de muestra que sea suficiente para mojar completamente su superficie dejando que fluya el exceso. Se coloca el tapón en la parte inferior del tubo de salida, de manera que quede introducido más de 6.3 mm. y menos de 9.5 mm. El tapón debe entrar suave, pero haciendo un cierre hermético para evitar que se escape el aire de la parte inferior del recipiente.

Si la temperatura a la que se va a realizar el ensayo es superior a la del ambiente, se calentará la muestra a una temperatura de 1 ó 2 grados por encima de la del ensayo y, si es inferior se enfriará la muestra a 1 ó 2 grados por debajo de la temperatura a la que se va a ensayar. En ningún caso se calentará la muestra a una temperatura superior a $27,8^{\circ}\text{C}$ por debajo de su punto de inflamación. Se vierte la muestra en el tubo hasta que deja de rebosar dentro del cilindro de rebose tras lo cual se mantendrá bien revuelta por medio del termómetro. La temperatura del baño se debe graduar hasta que la temperatura de la muestra dentro del tubo sea constante (ver Fotografía 5).



Fotografía 5: llevando la muestra a la temperatura constante de 135°C .

Después que la temperatura de la muestra ha permanecido constante con un error de $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ durante un minuto con agitación constante se saca el termómetro se limpia el exceso de muestra del cilindro de rebose por medio de la pipeta, pero teniendo cuidado de no golpear el rebosadero. En caso de que éste sea golpeado, se deberá recoger el ensayo. La punta de la pipeta deberá mantenerse en un punto fijo dentro del cilindro de rebose y en ningún caso se removerá el exceso de muestra rotando la pipeta alrededor de aquel.

Se coloca el frasco calibrado de 60 cm^3 en una posición tal que quede centrado con respecto al orificio de salida y que el material al fluir no toque las paredes del frasco. La graduación quedará situada a una distancia comprendida entre 10 y 13 cm. respecto del fondo del baño.

El ensayo se empieza sacando rápidamente el tapón del corcho del tubo, poniendo en marcha al mismo tiempo el cronómetro (ver Fotografía 6). Se para el cronómetro cuando la parte inferior del menisco alcanza la graduación del cuello del frasco calibrado.



Fotografía 6: Ensayo de viscosidad Saybolt-Furol.

Resultado:

El tiempo transcurrido entre el instante en el que se saco el corcho y el instante en que el menisco de la muestra alcanzo la marca de calibración, en segundos, es de 117 , a la temperatura de 135°C.

3.2 ENSAYO DE PENETRACION (ASTM D-5).

La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja normalizada en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Normalmente, el ensayo se realiza a 25°C (77°F) durante un tiempo de 5 s y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g, aunque pueden emplearse otras condiciones previamente definidas.

Equipo

- Penetrómetro.
- Aguja de penetración.
- Recipiente o molde para la muestra.
- Baño de agua María.
- Dispositivo medidor de tiempo.
- Termómetro.
- Espátula
- Asfalto

Procedimiento.

Preparación de la muestra.- Se toma las precauciones necesarias para que la muestra del ensayo sea verdaderamente representativa, de aspecto homogéneo y sin contaminación.

De la muestra de laboratorio, se separarán con una espátula caliente unos 400 a 500 g de material que se colocarán en un recipiente, que se calienta cuidadosamente agitándolo para evitar sobrecalentamientos locales y para homogeneizar el material, hasta que alcance la fluidez que permita su vertido en los moldes para las probetas. Se preparará un total de dos moldes por cada muestra de material y ensayo de iguales características.

Después de llenar los moldes, se cubren con un vaso de vidrio invertido, de dimensiones apropiadas, para protegerlos del polvo y permitir la eliminación de posibles burbujas de aire, y se dejan enfriar al aire a una temperatura entre 20° y 30°C, (68° y 86°F), por un período entre 1 y 1.5 horas. Finalmente, se sumergen los recipientes en el baño de agua maría a la temperatura de 25 °C (ver Fotografía 7), manteniéndolos así durante los mismos períodos de enfriamiento.



Fotografía 7: Preparación de las Muestras.

Ejecución del ensayo.- Primero se comprueba que el vástago soporte de la aguja está perfectamente limpio y seco, y que se deslice en forma suave y sin rozamiento sobre su guía. La aguja de penetración se limpia con tolueno u otro disolvente apropiado y se seca con un paño limpio, fijándola firmemente en su soporte.

Una vez transcurridos los tiempos de inmersión, se aproxima la aguja del penetrómetro hasta que su punta toque justamente la superficie de la muestra, sin que penetre. Se anota la lectura o se pone en cero el penetrómetro y se suelta seguidamente el mecanismo que libera la aguja durante el

tiempo especificado (ver fotografía 8). Finalmente, se lee y anota la distancia, expresada en décimas de milímetro, que haya penetrado la aguja en la muestra.



Fotografía 8: Penetración en las Muestras.

Se realizarán al menos tres penetraciones en cada recipiente, sobre diferentes puntos de la superficie separados, como mínimo, 10 mm (3/8") entre sí y de las paredes del recipiente. Después de cada penetración, se desmonta y saca la aguja y se limpia cuidadosamente con un trapo limpio y seco.

Resultados:

MOLDE	Penetración No.1	Penetración No.2	Penetración No.3	PROMEDIO
	0,1mm	0,1mm	0,1mm	0,1mm
Molde No1	66	67	66	66.33
Molde No.2	66	65	65	65.33
				65.83

3.3 ENSAYO DE DUCTILIDAD (ASTM D-113).

El ensayo de ductilidad, da la distancia en centímetros que una muestra normalizada de ligante asfáltico puede alargarse antes de que se rompa en dos. La ductilidad es medida en un equipo denominado “ductilómetro” mediante una prueba de “extensión” en donde una probeta de ligante

asfáltico es extendida o estirada a una velocidad de 5 Cm/minuto, en un baño de agua de igual densidad y una temperatura $25^{\circ} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Equipo

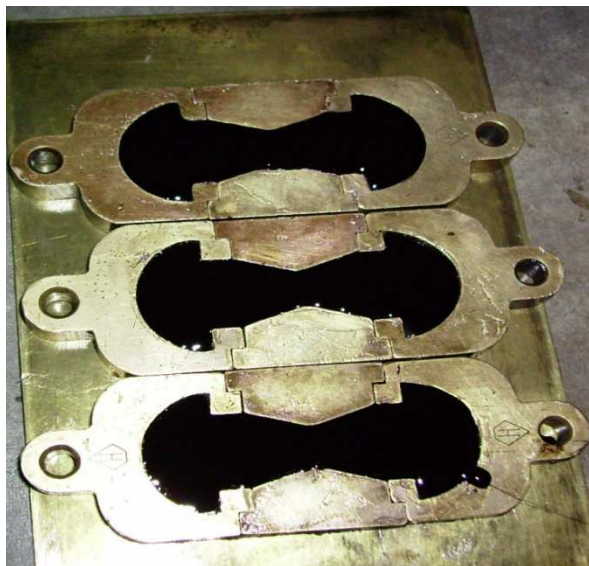
- Moldes.
- Placa.
- Baño de agua.
- Ductilómetro.
- Termómetro.
- Espátula
- Asfalto

Procedimiento.

Preparación de las probetas.- La placa con el molde se colocan sobre una superficie horizontal, debiendo comprobarse que todas las piezas del molde apoyen completamente sobre la placa.

El material asfáltico se calienta cuidadosamente, agitándolo en cuanto su consistencia lo permita para prevenir los sobrecalentamientos locales, hasta que esté lo suficientemente fluido para verterlo en los moldes.

El llenado en los moldes se hará con cuidado, procurando no distorsionar el correcto montaje de sus piezas, vertiendo el material en forma de chorro fino en un recorrido alternativo de extremo a extremo, hasta que se llene completamente y con un ligero exceso(ver fotografía 9), evitando la inclusión de burbujas de aire.



Fotografía 9: Preparación de las probetas.

La probeta, dentro del molde y protegida del polvo, se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 minutos, sumergiéndola a continuación en el baño de agua a la temperatura de 25°C durante otros 30 minutos. Seguidamente se quita el exceso de material del molde con una espátula recta caliente, hasta dejar la probeta perfectamente enrasada.

El conjunto de la placa, molde y probeta se introduce de nuevo en el baño de agua, manteniéndolo a la temperatura de 25°C, con una variación máxima de 0.1°C, (0.2°F), durante un tiempo comprendido entre 85 y 95 minutos. A continuación, se retira la placa del molde, se quitan las piezas laterales y se da comienzo al ensayo.

Ejecución del ensayo.- La probeta se monta en el ductilómetro, introduciendo cada pareja de clavijas de los sistemas fijo y móvil en los correspondientes orificios de cada pinza, poniendo a continuación en marcha el mecanismo de arrastre del ensayo a la velocidad especificada (ver fotografía 10), hasta que se produzca la rotura midiéndose la distancia en cm que se hayan separado ambas pinzas hasta este instante.



Fotografía 10: Muestras Estiradas Antes de que se Rompan.

El material asfáltico entre las pinzas se va paulatinamente estirando hasta formar un hilo, produciéndose la rotura en un punto en el que el hilo no tiene apenas sección transversal. Si durante el ensayo, el material bituminoso al estirarse tiene tendencia a subir hasta la superficie del agua o tocar la placa de fondo del ductilómetro, deberá ajustarse la densidad relativa del agua a la

del material ensayado, añadiendo cloruro de sodio, hasta conseguir que el hilo quede lo más recto posible, sin elevarse o descender.

Resultados:

DATO	Probeta No.1	Probeta No.2	Probeta No.3	Promedio
	Cm	cm	cm	cm
Muestra No.1	107.2	107.75	126	107.5
Tiempo	1,35,30	1,37,20	1,52,47	

3.4 ENSAYO DE PUNTO DE REBLANDECIMIENTO ANILLO Y BOLA (ASTM D-36).

Este ensayo mide de forma indirecta la consistencia y equivale a una temperatura de equiviscosidad en las condiciones de ensayo. Junto a la penetración a 25° C, permite calcular el índice de penetración y estimar mediante su valor la susceptibilidad de los asfaltos.

Equipo

- Anillos, de bronce, de bordes cuadrado.
- Platos de base.
- Esferas de acero de 9.5mm de diámetro, peso de cada una 3.5 gr.
- Guías de contacto de las bolas.
- Recipiente de vidrio capacidad 800 ml.
- Soporte de anillos y montaje completo.
- Termómetro.
- Agua destilada.
- Asfalto.

Procedimiento.

Preparación de muestras.- Calentar la muestra de material en forma cuidadosa, agitándola frecuentemente para evitar sobrecalentamientos localizados, hasta asegurar que esté suficientemente fluida para poderla verter. Al agitarse, deberá evitarse la formación de burbujas.

Calentar los dos anillos de bronce sin el plato de base, aproximadamente a la misma temperatura del producto asfáltico, y colóquense sobre el plato de base, tratado con un agente aislante.

Verterlo, con un ligero exceso, el producto bituminoso dentro de los anillos (ver Fotografía 11), y dejar enfriar a temperatura ambiente durante 30 minutos.



Fotografía 11: Preparación de la Muestra en los Anillos de Bronce.

Hacer el montaje de los aparatos, colocando los anillos con las muestras, las guías para las bolas y los termómetros en posición, y llenar el baño con agua destilada hasta una altura de 105 ± 3 mm.

Usando unas tenazas apropiadas, colocar las dos bolas en el fondo del baño para que adquieran la misma temperatura de iniciación que el resto del montaje.

Colocar todo el conjunto del baño, en agua con hielo (ver fotografía 12).



Fotografía 12: Bajando todo el conjunto del aparato y muestras a 0°C .

Calentar el baño en forma pausada, para asegurar que la rata de elevación de la temperatura sea constante a 5°C (9°F)/minuto Anotar, la temperatura indicada por el termómetro en el momento en que el producto bituminoso rodeando la bola, toca el fondo del baño (ver fotografía 13).



Fotografía 13: Punto de Reblandecimiento (Método “Anillo y Bola”).

Resultados:

Líquido Empleado	Agua Destilada
Punto de Ablandamiento (°C)	50

3.5 ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN (ASTM D-92).

El punto de inflamación de un ligante asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un “destello” en presencia de una llama abierta. El punto de inflamación no debe ser confundido con el punto de combustión, el cual es la temperatura más baja a la cual el ligante asfáltico se inflama y se quema. El punto de inflamación consiste, tan solo, en la combustión instantánea de las fracciones volátiles que se están separando del asfalto.

Equipo

- Aparato de copa abierta Cleveland.
- Termómetro.
- Asfalto

Procedimiento:

Llenar la copa a cualquier temperatura que no exceda de 100°C (180°F) por encima del punto de ablandamiento de la muestra de tal manera que la parte superior del menisco quede en la línea de llenado(ver Fotografía 14), encender la llama de ensayo y ajustar el diámetro .



Fotografía14: Preparación del equipo y muestra.

Se aplica calor inicialmente de tal manera que la rata de incremento de temperatura de la muestra sea de 14 a 17°C (25 a 30°F) por minuto. Cuando la temperatura de la muestra sea de aproximadamente 56°C (100°F) por debajo del punto de llama esperado, se disminuye el calor de manera que la temperatura se aumente, para los últimos 28°C (50°F) antes de llegar al punto de inflamación, en 5 a 6°C (9 a 11°F) por minuto.

Por lo menos a 28°C (50°F) bajo el punto de inflamación, se empieza a aplicar la llama de ensayo, una vez por cada aumento de 2°C (5°F). Pasar la llama de ensayo a través del centro de la copa (ver Fotografía 15)

Se registra como punto de inflamación, la lectura de temperatura sobre el termómetro cuando aparezca una llama en cualquier punto sobre la superficie. No debe confundirse la llama verdadera con el halo azulado que algunas veces rodea la llama de ensayo.



Fotografía 15: Ejecución del Ensayo.

Para determinar el punto de combustión, se continúa calentando la muestra de tal manera que la temperatura se aumente a una rata de 5 a 6°C (9 a 11°F) por minuto. Continuar la aplicación de la llama de ensayo, hasta que el aceite se encienda y permanezca quemándose por lo menos durante 5 s. Se regístrese la temperatura en este punto, como el punto de combustión.

Resultados:

Punto de Inflamación	288°C
Punto de Combustión	310°C

3.6 ENSAYO DE PÉRDIDA POR CALENTAMIENTO (ASTM D-6).

Este método de ensayo tiene por objeto determinar las pérdidas en peso de aceite y de compuestos asfálticos cuando se calientan.

Equipo

- Horno.
- Termómetro.
- Balanza A ± 0.01 gr.
- Recipiente.
- Asfalto

Procedimiento.

Agitar y mezclar completamente la muestra calentándola, para asegurar una muestra homogénea antes de remover la porción para ensayo. Colocar 50 ± 0.5 g de la muestra en el recipiente y pesar con aproximación a 0.01 g (ver Fotografía 16). Si el material se ha calentado, enfriar a temperatura ambiente antes de hacer la pesada inicial.



Fotografía 16: Peso de las Muestras.

Regular el horno a una temperatura de 163°C (325°F), y colocar el recipiente con la muestra en su interior sobre la placa circular, en uno de los huecos (ver Fotografía 17). Cerrar el horno y poner a girar la placa durante todo el ensayo, a una velocidad de 5 a 6 r.p.m. Mantener la temperatura a $163^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($325 \pm 1.8^{\circ}\text{F}$) durante 5 horas después de que la muestra se haya introducido y el horno alcance la temperatura especificada. El tiempo de 5 horas empieza cuando la temperatura llegue a 162°C (324°F).



Fotografía 17.- Calentando las muestras en el horno.

Al terminar el período de calentamiento se saca la muestra, se deja enfriar y se pesa calculando la pérdida en peso que se ha producido.

Luego para determinar la penetración y el punto de reblandecimiento, la muestra después del calentamiento, se funde el residuo en el recipiente a la temperatura más baja, posible, mezclándola completamente y teniendo cuidado de evitar la incorporación de burbujas de aire y se realiza dichos ensayos.

Resultados:

PÉRDIDA POR CALENTAMIENTO.

Recipiente	Peso Recipiente	Recipiente + Asfalto		Asfalto		Pérdida
		Antes	Después	Antes	Después	
	G	g	g	g	g	%
1	46.35	99.44	99.37	53.09	53.02	0.13
2	45.74	95.62	95.53	49.88	49.79	0.18
3	46.65	96.78	96.67	50.13	50.02	0.22
PROM.						0.18

PENETRACION DESPUES DEL ENSAYO DE PERDIDA POR CALENTAMIENTO.

MOLDE	Penetración No.1	Penetración No.2	Penetración No.3	PROMEDIO
	0,1mm	0,1mm	0,1mm	0,1mm

Molde No1	46	45	45	45.33
Molde No.2	47	46	47	46.67
				46.00
T. Ensayo °C	25	% del original		69.88

PUNTO DE ABLANDAMIENTO APARATO DE ANILLO Y BOLA DESPUES DEL ENSAYO DE PERDIDA POR CALENTAMIENTO.

Liquido Empleado	Agua Destilada	Punto de Reblandecimiento (°C)	50,5
------------------	-----------------------	--------------------------------	-------------

3.7 ENSAYO DE LA MANCHA (AASHTO T-102).

El ensayo de la mancha o de "Oliensis" es un procedimiento que permite comprobar si un asfalto ha sido sometido a temperaturas capaces de originar procesos de descomposición térmica (cracking) o si ha sido contaminado con productos que los hayan tenido. El resultado de esta prueba tiene una valoración visual.

Equipo

- Un frasco Erlenmeyer de 25ml.
- Balanza A \pm 0.01gr.
- Papel filtro.
- Varilla de vidrio con extremos redondeados.
- Gasolina.
- Asfalto.

Procedimiento.

Se pesan 2 g de la muestra de asfalto.

Se calientan al horno en el frasco Erlenmeyer hasta que la muestra se extienda y forme una película que cubra el fondo del recipiente.

Se deja enfriar a la temperatura ambiente y se agregan 10.2 ml de gasolina y se pesa el conjunto (ver Fotografía 18).



Fotografía 18: Agregando gasolina a la muestra.

Se coloca el tapón de corcho provisto del tubo, se agita durante 5 segundos en forma circular y se sumerge hasta el cuello en un baño de agua hirviendo (ver Fotografía 19); después de 1 minuto se retira, se agita en forma circular durante 5 segundos y se repite el ciclo completo hasta que el asfalto se diluya por completo.



Fotografía 19: Muestra en baño de agua.

Cumplida la dilución completa ayudada del calentamiento, se deja enfriar a la temperatura ambiente. La mezcla anterior se coloca durante 15 minutos en un baño a $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; se retira, se agita y con la varilla de vidrio se toma una pequeña porción, dejando caer dos gotas sobre el papel filtro el cual se mantiene en el aire, horizontalmente (ver fotografía 20).



Fotografía 20: Tomando muestra para dejar caer en el papel filtro.

Se considera que el ensayo da resultado "negativo" cuando las dos manchas obtenidas en el paso anterior son uniformes y sin un núcleo o anillo de color más oscuro en su interior.

Se considera que el ensayo es "positivo" cuando en cualquiera de las dos manchas obtenidas se observa un núcleo o anillo de color más oscuro en su interior. En caso de precisarse de una estimación cuantitativa, se seguirá el siguiente procedimiento cuando se tienen resultados positivos.

Resultado: Negativo

3.8 ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO (ASTM D-70).

Se entiende como peso específico de un material a la relación de su peso en el aire a una temperatura dada, al peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura, a los 25°C.

Además de dar una identificación de la calidad y origen del material, el peso específico es útil para determinar el peso por unidad de volumen de un ligante calentado a la temperatura de aplicación.

Equipo

- Picnómetro.
- Baño de agua.
- Termómetro.
- Recipiente de vidrio boca ancha de 600ml.
- Balanza A ± 0.01 gr.
- Agua destilada.
- Asfalto.

Procedimiento.

Calibración del picnómetro.- Se limpia perfectamente el picnómetro y su tapón con el líquido de limpieza, enjuagándolo a continuación con agua destilada y secándolo finalmente. Esta operación de limpieza debe realizarse antes de cada calibración, o bien cuando se observe cualquier falla en el escurrimiento uniforme de los líquidos, en las paredes interiores del picnómetro o en el capilar del tapón.

Después de secado, se deja que el picnómetro alcance la temperatura ambiente y se pesa con aproximación de 1 mg. El peso del picnómetro vacío, se designa por A.

Se seca el vaso del baño y se llena el picnómetro con agua destilada, colocando suavemente el tapón, sin apretarlo. Se sumerge completamente el picnómetro en el vaso y se aprieta entonces el tapón, no debiendo quedar burbujas de aire ocluidas en el picnómetro en esta operación. El vaso con el picnómetro se vuelve a colocar en el baño de agua a 25 °C.

Se deja el picnómetro en el interior del vaso por un mínimo de 30 minutos, se saca del agua e inmediatamente se seca la superficie superior del tapón pasando suavemente y una sola vez un paño seco por la misma; a continuación, se seca rápidamente el resto del picnómetro y se pesa con aproximación de 0.1 mg. El peso del picnómetro lleno de agua, se designa por B.

Preparación de la muestra.- Calentar con cuidado la muestra, agitándola para evitar sobrecalentamientos locales hasta que llegue a ser suficientemente fluida para que pueda ser

vertida. La muestra debe ser representativa de la existente en el laboratorio y deberá ser homogénea y no estar contaminada.

Verterlo una cantidad de muestra suficiente dentro del picnómetro limpio y seco previamente calentado, llenándolo hasta tres cuartos de su capacidad. Tomar precaución para evitar que el material se ponga en contacto con las paredes del picnómetro por encima del nivel final y para evitar la inclusión de burbujas de aire. Dejar enfriar el picnómetro con su contenido hasta la temperatura ambiente durante un período no menor de 40 minutos y pesar con el tapón (ver Fotografía 21), con aproximación a 1 mg. El peso del picnómetro con la muestra, se designa como C.



Fotografía 21: Pesando el conjunto picnómetro + asfalto

Llenar el picnómetro que contiene el asfalto con agua destilada, colocando firmemente el tapón en el picnómetro. No deben permitirse burbujas de aire en el picnómetro. Colocar el picnómetro en el vaso y apretar firmemente el tapón. Retornar luego el vaso al baño de agua a 25° C.

Mantener el picnómetro dentro del baño de agua durante un período no menor de 30 minutos (ver Fotografía 22). Sacar y pesar, este peso del picnómetro con la muestra y con agua, se designa como D.



Fotografía 22: Baño de agua a 25°C conjunto picnómetro + asfalto + agua.

Resultados:

ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO (ASTM D-70).

Peso del Picnómetro lleno de Agua	(b)	69.93
Peso del Picnómetro solo	(a)	36.46
(b-a)		33.47
Peso del Picnómetro + Cemento Asfaltico	(c)	59.01
Peso del Picnómetro Solo	(a)	36.46
(c-a)		22.55
Peso del Picnómetro + Asfalto + Agua para llenar el Picnómetro (d)		70.20
Peso del Picnómetro + Cemento Asfaltico	(c)	59.01
(d-c)		11.19
(b-a)-(d-c)		22.28
$\text{Gravedad Especifica} = \frac{(c-a)}{(b-a)-(d-c)}$		1.012

3.9 INDICE DE PENETRACIÓN DEL ASFALTO.

Este índice, concebido por Pfeiffer y Van Doormal, se calcula a partir de los valores de la penetración y del punto de ablandamiento y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad de estos materiales a los cambios de temperatura y de su comportamiento reológico.

El fundamento del método de obtención del IP se basa en admitir, por un lado, que a la temperatura del punto de ablandamiento (anillo y bola) la penetración de un cemento asfáltico es de 800, y, por otro, que los valores de la penetración en función de la temperatura se representan por una línea recta, si se elige en ordenadas una escala logarítmica para la penetración.

El cálculo del IP se obtiene mediante la expresión:

$$A = 50. \left[\frac{\log 800 - \log Pen}{Tab-25} \right] \quad IP = \frac{20 - 10.A}{A+1}$$

En esta investigación nos da como resultado el punto de reblandecimiento 50°C y la penetración 65.83.

Remplazando en

$$A = 50. \left[\frac{\log 800 - \log 65.83}{50 - 25} \right] \quad A = 2.169$$

Remplazando en IP

$$IP = \frac{20 - 10 * 2.169}{2.169 + 1} \quad \mathbf{IP = -0.53}$$

De los ensayos realizados se tiene los siguientes resultados, los mismos que son comparados con su respectiva especificación exigida por el MOPT (ver Tabla 5). Observándose que todos y cada uno de los ensayos realizados cumplen con los requerimientos.

ENSAYOS	60-70	RESULTADO	NORMA
Betún original	MINIMO MAXIMO		
Viscosidad a 135°C Saybolt-Furol, SSF.	100 —	117	ASTM E- 102
Penetración (25 °C, 100gr, 5s)mm/10	60 70	65.83	ASTM D-5
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min), cm	100 —	107.5	ASTM D-113
Densidad relativa, (25 °C/25 °C),Ton/m3	1,00 —	1.012	ASTM D-70
Punto de reblandecimiento A y B, °C	48 57	50	ASTM D-36
Índice de penetración (*)	-1,5 +1,5	-0.53	
Punto de inflamación, Copa Cleveland, °C	232 —	288	ASTM D-92
Perdida por calentamiento %		0.18	ASTM D-6
Ensayo de la mancha (**)	NEGATIVO	NEGATIVO	AASHTO T-102
Ensayos al residuo TFOT			
Penetración, % de penetración original	—	69.88	
Punto de reblandecimiento A y B, °C	—	50.5	

Tabla 5: Caracterización del Ligante Asfáltico AC-20 de Índice de Penetración 60/70.

CAPITULO 4: ENSAYOS EN LOS AGREGADOS.

Los ensayos de control y verificación de las características de los agregados pétreos para hormigón asfáltico son de gran importancia porque tratan de reproducir el comportamiento a escala real del material, el mismo que debe ser de conocimiento por parte del productor, comercializador, constructor y fiscalizador en trabajos de pavimentación.

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos y se enuncia la norma que los rige. Los resultados obtenidos y la comparación con las especificaciones del MTOP en cada ensayo pueden observarse en la Tabla 6.

4.1 PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS EN LOS AGREGADOS (ASTM D 5821-95).

Este ensayo determina el porcentaje, en peso, del material que presente una o más caras fracturadas de la muestra del agregado grueso.

Equipo

- Balanza A ± 0.01 gr.
- Tamices (1½" y 3/8").
- Cuarteador.
- Espátula.
- Agregado grueso de la mina de Cashapamba.

Procedimiento.

La muestra para ensayo será representativa de la granulometría promedio del agregado, y se obtendrá mediante un cuidadoso cuarteo del total de la muestra recibida.

Se separa por tamizado la fracción de la muestra comprendida entre los tamaños 37.5 mm y 9.5 mm (1½" y 3/8"). Descartar el resto.

Esparcir la muestra en un área suficientemente grande, para inspeccionar cada partícula.

Separar con el borde de la espátula, las partículas que tengan una o más caras fracturadas (ver fotografía 23). Si una partícula de agregado redondeada presenta una fractura muy pequeña, no se clasificará como "partícula fracturada". Una partícula se considerará como fracturada cuando un 25% o más del área de la superficie aparece fracturada. Las fracturas deben ser únicamente las recientes, aquellas que no han sido producidas por la naturaleza, sino por procedimientos mecánicos.



Fotografía 23: Separando las partículas fracturadas y no fracturadas.

Pesar las partículas fracturadas y anotar este valor.

Resultados:

Agregado grueso de la mina de Cashapamba.

Peso Inicial	2500 gr
Peso Fracturadas (F)	1620 gr
Peso Cuestionables(Q)	870 gr
Peso no Fracturadas(N)	10 gr
%caras fracturadas ($P = \left[\frac{F+Q/2}{F+Q+N} \right] * 100$)	82.20%

4.2 EQUIVALENTE DE ARENA (ASTM D-2419).

Este ensayo tiene por objeto determinar la proporción relativa del contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos. Es un procedimiento que se puede utilizar para lograr una correlación rápida en campo.

Equipo

- Cilindro graduado de plástico, con diámetro interior de 31.75 ± 0.381 mm ($1\frac{1}{4} \pm 0.015$ ") y altura de 431.8 mm (17") aproximadamente, graduado en espacios de 2.54 mm (0.1"), desde el fondo hasta una altura de 381 mm (15").
- Tapón macizo de caucho.
- Tuvo irrigador.

- Tubo flexible de plástico.
- Un botellón de 3.785 litr.
- Dispositivo para tomar lecturas.
- Recipiente metálico.
- Embudo de boca ancha.
- Cronómetro.
- Tamiz N° 4.
- Solución (Cloruro de Calcio).
- Agregado fino de la mina de Mulaló.

Procedimiento.

Antes de seleccionar la muestra de ensayo se deben desmenuzar todos los terrones de material fino, y pasar por el tamiz de 4.75 mm (No.4),

Verter la solución de trabajo de cloruro de calcio en el cilindro graduado, hasta una altura de 101.6 ± 2.54 mm (4 ± 0.1 ").

Con ayuda del embudo, se vierte la muestra de 50 gr de arena en el cilindro graduado. Golpear varias veces el fondo del cilindro con la palma de la mano para liberar las burbujas de aire y remojar la muestra completamente. Dejar en reposo durante 10 ± 1 minuto.

Al finalizar los 10 minutos (periodo de humedecimiento), tapar el cilindro con un tapón y soltar el material del fondo invirtiendo parcialmente el cilindro y agitándolo a la vez.

Después de soltar el material del fondo, agitar el cilindro, hasta completar 100 ciclos tal como se puede observar en la fotografía 24.



Fotografía 24: Agitando la muestra.

Inmediatamente después de la operación de agitación, colocar el cilindro verticalmente sobre la mesa de trabajo y remover el tapón.

Procedimiento de irrigación.

Durante el procedimiento de irrigación mantener el cilindro vertical y la base en contacto con la superficie de trabajo. Colocar el tubo irrigador en la parte superior del cilindro, aflojar la pinza de la manguera y lavar el material de las paredes del cilindro a medida que baja el irrigador, el cual debe llegar a través del material, hasta el fondo del cilindro, aplicando suavemente una acción de presión y giro mientras que la solución de trabajo fluye por la boca del irrigador. Esto impulsa hacia arriba el material fino que esté en el fondo y lo pone en suspensión sobre las partículas gruesas de arena, se debe llenarlo hasta 15" (ver Fotografía 25).



Fotografía 25: Adición de cloruro de calcio hasta 15".

Dejar el cilindro y el contenido en reposo por $20 \text{ min} \pm 15 \text{ s}$. Comenzar a medir el tiempo inmediatamente después de retirar el tubo irrigador.

Al finalizar los 20 min del periodo de sedimentación, leer y anotar el nivel de la parte superior de la suspensión arcillosa (ver Fotografía 26).



Fotografía 26: Tomando lectura de arcilla.

Este valor se denomina "lectura de arcilla".

Determinación de la lectura de la arena.

Después de tomar la lectura de arcilla, introducir dentro del cilindro el conjunto del disco, la varilla y el sobrepeso , y bajar suavemente el conjunto hasta que llegue sobre la arena.

Cuando el conjunto toca la arena, leer y anotar el de la ranura del tornillo, la cual se denominará "lectura de arena"(ver Fotografía 27).



Fotografía 27: Tomando lectura de arena.

Resultado:

Agregado fino de la mina de Mulaló.

Masa de la muestra =	50	gramos
Lectura de la Arcilla (pulg) A	3.9	pulgadas
Lectura de la Arena (pulg) B	3.2	pulgadas
Equivalente de Arena $C = (B/A) \cdot 100$	82.05	%

4.3 ABRASIÓN DE AGREGADO GRUESO MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (ASTM C-131).

Este ensayo se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada máquina con una carga abrasiva.

Equipo

- Balanza $A \pm 0.1$ gr.
- Horno.
- Tamices ($3/4"$, $1/2"$, $3/8"$ y N°12).
- Máquina de los Ángeles.
- Esferas de acero de diámetro 46.38mm y peso 390gr.
- Agregado grueso de la mina de Cashapamba.

Procedimiento.

La muestra de ensayo consiste en agregado limpio por lavado y secado en horno a una temperatura constante, separada por fracciones de cada tamaño y recombinadas con una de las granulometrías indicadas en la Tabla No.2. El tipo de abrasión que se realizara será de tipo B. La muestra antes de ensayarla será pesada con aproximación de 1 g.

La muestra y la carga abrasiva correspondiente, se colocan en la máquina de Los Ángeles (ver Fotografía 28), y se hace girar el cilindro a una velocidad comprendida entre 188 y 208 rad/minuto (30 y 33 r.p.m.); el número total de vueltas será 500. La máquina deberá girar de manera uniforme para mantener una velocidad periférica prácticamente constante. Una vez cumplido el número de vueltas prescrito, se descarga el material del cilindro y se procede con una separación preliminar de

la muestra ensayada, en un tamiz más grueso que el de 1.70 mm (No.12). La fracción fina que pasa, se tamiza a continuación empleando el tamiz de 1.70 mm (No.12) (ver Fotografía 29). El material más grueso que el tamiz de 1.70 mm (No.12) se lava, se seca en el horno, a una temperatura comprendida entre 105 a 110°C (221 a 230°F), y se pesa con precisión de 1 g.



Fotografía 28: Colocando el material en la Maquina de los Ángeles.



Fotografía 29: Separando el materia fino con tamiz No.12.

Resultados:

Agregado grueso de la mina de Cashapamba.

Masa de la Muestra (A)	5000
Masa Retenida en el Tamiz No. 12 Después de 500 Revoluciones (B)	3370
Masa que Pasa el Tamiz No. 12 (C)	1630
Porcentaje de Desgaste $D = (C/A)*100$	32.6 %

4.4 PESO ESPECÍFICO AGREGADO FINO (ASTM D-128).

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del peso específico aparente, lo mismo que la cantidad de agua que se absorbe en el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

El peso específico aparente es la relación entre el peso al aire del sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente.

Equipo

- Balanza $A \pm 0.01$ gr.
- Tamiz N° 4.
- Matraz aforado.
- Molde cónico.
- Varilla para apisonado.
- Bandeja de zinc.
- Baño de agua.
- Agregado fino de la mina de Mulaló.

Procedimiento.

Se debe primeramente homogeneizar completamente la muestra y eliminar el material de tamaño superior a 4.75 mm (tamiz No.4), se selecciona, por cuarteo, una cantidad de aproximadamente 1000 g, que se seca en el horno a 100 - 110°C, se enfría luego al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, repitiendo el secado hasta lograr peso constante. A continuación se cubre la muestra completamente con agua y se la deja así sumergida durante 24 ± 4 horas.

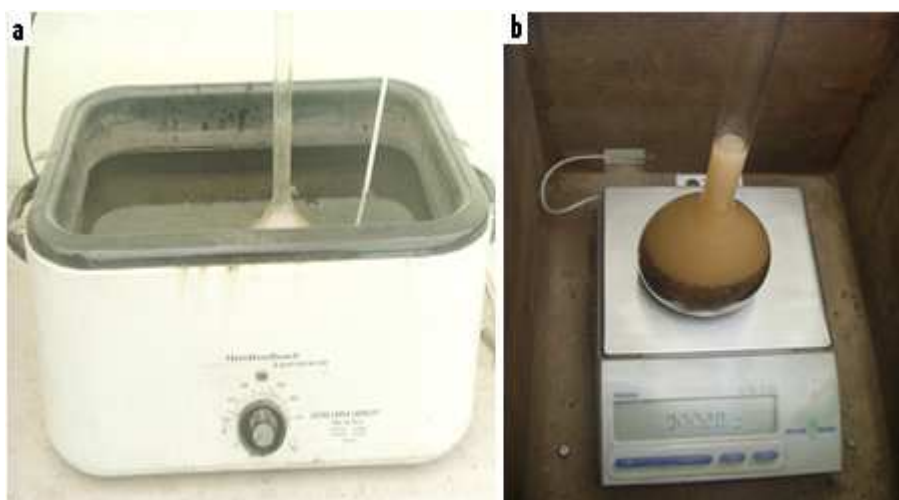
Después del período de inmersión, se decanta cuidadosamente el agua para evitar la pérdida de finos y se extiende la muestra sobre una bandeja (ver Fotografía 30a), comenzando la operación de desecar la superficie de las partículas, dirigiendo sobre ella una corriente moderada de aire caliente, mientras se agita continuamente para que la desecación sea uniforme, y continuando el secado hasta que las partículas puedan fluir libremente.

Para fijar este punto, cuando se empieza a observar visualmente que se está aproximando el agregado a esta condición, se sujeta firmemente el molde cónico con su diámetro mayor apoyado sobre una superficie plana no absorbente, echando en su interior a través de un embudo y sin apelmazar, una cantidad de muestra suficiente, que se apisona ligeramente con 25 golpes de la varilla (ver Fotografía 30b), levantando a continuación, con cuidado, verticalmente el molde. Si la superficie de las partículas conserva aún exceso de humedad, el cono de agregado mantendrá su forma original, por lo que se continuará agitando y secando la muestra, realizando frecuentemente la prueba del cono hasta que se produzca un primer desmoronamiento superficial (ver Fotografía 30c), indicativo de que finalmente ha alcanzado el agregado la condición de superficie seca.



Fotografía 30: Preparando la muestra.

Inmediatamente, se introducen en el picnómetro previamente tarado, 500.0 g del agregado fino, y se le añade agua hasta aproximadamente un 90 por ciento de su capacidad; para eliminar el aire atrapado se rueda el picnómetro sobre una superficie plana(ver Fotografía 30d), e incluso agitando o invirtiéndolo si es preciso, introduciéndolo seguidamente en un baño de agua a una temperatura de 25°C (ver Fotografía 31a) durante 1 hora, transcurrida la cual se enrasa con agua a igual temperatura, se saca del baño, se seca rápidamente su superficie y se determina su peso total (picnómetro, muestra y agua)(ver Fotografía 31b), con una aproximación de 0.1 g.



Fotografía 31: Peso Especifico Aparente.

Resultados:

Agregado fino de la mina de Mulaló.

Peso muestra seca al horno	(A)	493,8 gr
Peso Frasco + Agua	(B)	667,2gr
Peso Frasco + Agua + Material	(C)	965,8 gr
Peso de la muestra sss		500 gr
Gravedad especifica de masa	$\frac{A}{B+500-C}$	2,452
Gravedad especifica sss	$\frac{500}{B+500-C}$	2,483
Gravedad especifica aparente	$\frac{A}{A+B-C}$	2,530
% de absorción	$\frac{(500-A)*100}{500}$	1,240

4.5 PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN AGREGADO GRUESO (ASTM D-127).

Este ensayo sirve para determinar los pesos específicos aparente y nominal, así como la absorción, después de 24 horas de sumergidos en agua, de los agregados con tamaño igual o mayor a 4.75 mm (tamiz No.4)

Equipo

- Balanza A ± 0.01 gr.
- Tamiz No.4.
- Canastilla metálica.
- Dispositivo de suspensión.
- Agregado grueso de la mina de Cashapamba.

Procedimiento.

Se comienza por mezclar completamente el agregado, cuarteándolo a continuación, hasta obtener aproximadamente la cantidad mínima necesaria para el ensayo, después de eliminar el material inferior a 4.75 mm. Las cantidades mínimas para ensayo se indican en la Tabla No.3, en este caso al tener un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ pulg, la cantidad de la muestra es de 3kg.

La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en un horno a 100° - 110°C y se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, repitiendo el secado hasta lograr peso constante, y se sumerge en agua, también a temperatura ambiente, durante 24 ± 4 horas.

Después del período de inmersión, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un paño absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible, secando individualmente los fragmentos mayores. Se tomarán las precauciones necesarias para evitar cualquier evaporación de la superficie de los agregados. A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturada con superficie seca (S.S.S.) (ver Fotografía 32).



Fotografía 32: Peso de la muestra en Estado SSS.

A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergida en el agua, a la temperatura de 25°C (ver Fotografía 33).

La canastilla y la muestra deberán quedar completamente sumergidas durante la pesada y el hilo de suspensión será lo más delgado posible para que su inmersión no afecte a las pesadas.

Se seca entonces la muestra en horno a 100° - 110°C, se enfría al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas y se determina su peso seco hasta peso constante.



Fotografía 33: Peso de la muestra sumergido.

Resultados:

Agregado grueso de la mina de Cashapamba.

Peso muestra seca al horno	(A)	3,054 Kg
Peso aire muestra saturada	(B)	3,084 Kg
Peso agua de muestra saturada	(C)	1,858 Kg
Gravedad específica de masa	$\frac{A}{B-C}$	2,491
Gravedad específica sss	$\frac{B}{B-C}$	2,515
Gravedad específica aparente	$\frac{A}{A-C}$	2,554
% de absorción	$\frac{B-A}{A} *$	
100		0,982

4.6 PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS (ASTM D-4791).

Las partículas planas y alargadas son definidas respectivamente, como aquellas partículas cuya dimensión última es menor que 0.6 veces su dimensión promedio y aquellas que son mayores 1.8 veces la dimensión promedio.

Equipo

- Calibradores metálicos.
- Tamices (1", 3/4", 1/2", 3/8" y 1/4").
- Balanza A \pm 0.1 gr.
- Cuarteador de agregados.
- Recipientes metálicos.
- Agregado grueso de la mina de Cashapamba.

Procedimiento.

Preparación de la muestra.- Del material recibido en el laboratorio, se separa por cuarteo una muestra representativa, con cantidad suficiente para la realización del ensayo (ver Fotografía 34).



Fotografía 34: Cuarteo de Muestras.

Una vez así separada la muestra para ensayo, se procede a determinar su análisis granulométrico usando los tamices entre dos aberturas 1" a 3/4", 3/4" a 1/2", 1/2" a 3/8", etc. De cada fracción retenida entre cada dos tamices sucesivos se toma un mínimo de 200 partículas para ensayarse.

Cada fracción es calibrada una a continuación de otra, partícula por partícula, en el calibrador metálico como se indica en la fotografía 35.



Fotografía 35: Pasando las partículas por el calibrador metálico.

El ancho de la ranura usada en esta investigación en la plantilla de calibración es para los tamaños de 1", 3/4", 1/2" y 3/8".

La cantidad total que pasa el calibrador será pesada con una precisión de por lo menos 0.1% del peso de la muestra ensayada.

El índice de laminamiento es el peso total del material que pasa los calibradores de los diferentes tamaños, expresado como un porcentaje del peso total de la muestra calibrada.

Resultados:

Agregado grueso de la mina de Cashapamba.

Tamaño del Tamiz Abertura Cuadrada Estándar U.S	Ancho de Ranura de Tamiz	Peso Retenido en Tamiz Ranurado	Peso que Pasa Tamiz Ranurado	Peso Total	Índice de Laminación
plg	Plg	gr	gr	gr	%
1-3/4	0.525	800	45	845	
3/4-1/2	0.375	1673	140	1813	
1/2-3/8	0.263	884	80	964	
3/8-1/4	0.184	966	80	1046	
TOTAL		4323	345	4668	7.4

De los ensayos realizados a los agregados pétreos se tiene los siguientes resultados, los mismos que son comparados con su respectiva especificación exigida por el MTOP y se presentan en la Tabla 6. Observándose que todos y cada uno de los ensayos realizados cumplen con los requerimientos.

ENSAYOS	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO	NORMA
	MINIMO	MAXIMO		
% de Caras Fracturadas en Gruesos.	80	--	82,2	ASTM D 5821-95
Equivalente de Arena.(%)	50	--	82,05	ASTM D-2419
Abrasión de Gruesos (%).	.--	40	32,6	ASTM C-131
Peso Específico de Finos. (Ton/m3)	--		2,452	ASTM D-128
Absorción de agregado Fino.(%)	--		1,24	ASTM D-128
Peso Específico de Gruesos. (Ton/m3)	--		2,491	ASTM D-127
Absorción de agregado Grueso.(%)	--		0.982	ASTM D-127
Partículas Alargadas y Planas. (%)	.--	10	7.4	ASTM D-4791

Tabla 6. Resultados de los Ensayos en los Agregados.

CAPITULO 5: ENSAYOS SOBRE LA MEZCLA ASFÁLTICA.

5.1 MEZCLA ASFÁLTICA.

5.1.1 GRANULOMETRÍA Y MEZCLA DE AGREGADOS.

5.1.1.1 GRANULOMETRÍA (ASTM C-71).

El análisis granulométrico de un material tiene por objeto separar y clasificar los gránulos de que está formado según su tamaño, esta separación se hace mediante una colección de tamices de malla cuadrada.

Equipo

- Balanza $A \pm 0.01$ gr.
- Tamices de malla cuadrada (1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°8, N°30, N°50, N°100, N°200.)
- Bandejas metálicas.
- Cepillo de acero.
- Brocha.
- Agregado fino de la mina de Mulaló.
- Agregado grueso de la mina de Cashapamba.

Procedimiento.

Granulometría agregado Grueso mina Cashapamba.

Primeramente se efectúa un muestreo para el agregado grueso mediante el cuarteo (ver Fotografía 36), que consiste en colocar a la muestra en el separador para obtener una muestra representativa que abarque el mayor tamaño de partículas.

La muestra escogida de agregado grueso se coloca en una bandeja para determinar la masa de la bandeja y la muestra.



Fotografía 36: Cuarteo de muestras.

Tomamos la muestra, se coloca sobre la torre de cedazos conformado por los tamices de 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°8, N°30, N°50, N°100, N°200, (ver Fotografía 37a) inmediatamente con movimientos circulares facilitamos que las partículas puedan retenerse o pasar en cada uno de los tamices (ver Fotografía 37b).

Los resultados del ensayo se dan en porcentajes del peso total del material que pasa cada tamiz de dimensiones conocidas, para lo cual se pesan las respectivas cantidades retenidas y sumadas en forma acumulativa a las anteriores de tamaño mayor, estos pesos acumulados se divide para el peso total de la muestra ensayada y se multiplica por 100. La diferencia a 100 de cada uno de estos porcentajes acumulados nos da el porcentaje que deja pasar el tamiz correspondiente, los resultados de este ensayo se pueden ver en la Tabla 7 .



Fotografía 37: Serie de tamices(a); movimientos circulares (b).

Granulometría agregado Fino mina Mulaló .

Se realiza un muestreo mediante el cuarteador y se determina la masa del agregado fino, así como del recipiente que lo contiene.

Colocamos los tamices en orden de modo que el tamaño de abertura de los mismos sea decreciente, estos tamices van estar ordenados así: 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°8, N°30, N°50, N°100, N°200, y la bandeja.

Colocamos la muestra en esta columna que dormán los tamices y lo tamizamos, una vez realizado este proceso, retiramos los tamices y recogemos la muestra de arena retenida en cada tamiz, para ello nos ayudamos de un cepillo de acero.

Recogida la muestra determinamos su masa de cada tamiz retenido y la sumatoria de la muestra recogida en cada tamiz deberá ser igual a la masa total de la muestra antes de ser tamizada, los resultados de este ensayo están indicados en la Tabla 7 y se dan igual que el agregado grueso en porcentajes.

5.1.1.2 MEZCLA DE AGREGADOS.

En la fabricación de carpetas asfálticas, es importante emplear áridos de granulometría correcta porque entonces se conseguirá una carpeta de rodadura de buena calidad y una economía de ligante. La calidad del agregado está condicionada al cumplimiento de un conjunto de especificaciones entre las que se encuentra el % de vacíos, el % vacíos rellenados de asfalto, la estabilidad, la fluencia, etc. Y todas están íntimamente relacionadas con la granulometría.

En el análisis de materiales pétreos para bases, sub-bases, pavimentos asfálticos muchas veces es preciso formar mezclas de dos hasta cinco tipos de materiales pétreos en los siguientes casos:

- Cuando uno o más de los materiales no cumplen especificaciones de granulometría.
- Cuando en un banco o mina de materiales no exista la cantidad suficiente como para abastecer una gran demanda y
- Cuando los materiales son obtenidos por trituración y se requiere formar una granulometría especificada.

El procedimiento general consiste en obtener la granulometría de cada uno de los materiales a mezclarse y calcular el porcentaje que se precisa de cada uno para obtener una granulometría deseada.

En la presente investigación se realizará la mezcla de agregados con dos tipos de materiales, el agregado fino de Mulaló con el agregado grueso de Cashapamba, para la cual se ha determinado que la faja granulométrica para la realización de la mezcla asfáltica es la de 3/4", esta faja se la eligió en consideración de que los materiales que se disponía, tanto para el agregado grueso como para el fino se ajusta a las exigencias del MTOP mostradas en la tabla 4, con lo cual se estableció que la mezcla de agregados estará compuesta por el 60 por ciento de agregado grueso y el 40 por ciento de agregado fino para la granulometría de la mezcla, estos resultados se puede observar en la Tabla 7.

En la siguiente tabla se presenta los pesos del material retenidos en cada tamiz tanto para el agregado grueso como el fino, así como también la dosificación de las mezclas.

TAMIZ N°	PESO RETENIDO ACUMULA DO		PORCENTAJ E RETENIDO		PORCENTAJE QUE PASA				DISEÑO PASA		%
	(Gramos)		(%)		(%)		(%)		(%)	(%)	
	1	2	1	2	1	2	Dosificación		Mezcl a	Limites Faja ¾"	
	Grues o	Fino	Grueso	Fino	Grueso	Fino	Grueso	Fino			
								60	40		
1"							60,0	40,0	100	100	
¾"	36,0	0,0	1,5	0,0	98,5	100,0	59,1	40,0	99,1	90-100	
½"	730,0	5,9	30,5	0,6	69,5	99,4	41,7	39,8	81,5		
⅜"	1321, 0	18,3	55,2	1,7	44,8	98,3	26,9	39,3	66,2	56-80	
N°.4	1911, 6	178,4	79,9	17,0	20,1	83,0	12,0	33,2	45,2	35-65	
N°.8	2040, 4	327,3	85,3	31,3	14,7	68,7	8,8	27,5	36,3	23-49	
N°.16	2115, 8	483	88,5	46,1	11,5	53,9	6,9	21,5	28,5		
N°.30	2167, 9	615,5	90,7	58,8	9,3	41,2	5,6	16,5	22,1		
N°.50	2217, 0	743,2	92,7	71,0	7,3	29,0	4,4	11,6	16,0	5-19	
N°.100	2263, 4	860,5	94,7	82,2	5,3	17,8	3,2	7,1	10,3		
N°.200	2310, 4	939,2	96,6	89,7	3,4	10,3	2,0	4,1	6,1	2-8	
PASA 200	80,6	107,8									
TOTAL	2391, 0	1047, 0									

Tabla 7: Análisis granulométrico de la mezcla de agregados.

Las especificaciones de granulometría de la mezcla de los agregados, para esta investigación se presentan en el gráfico 1.

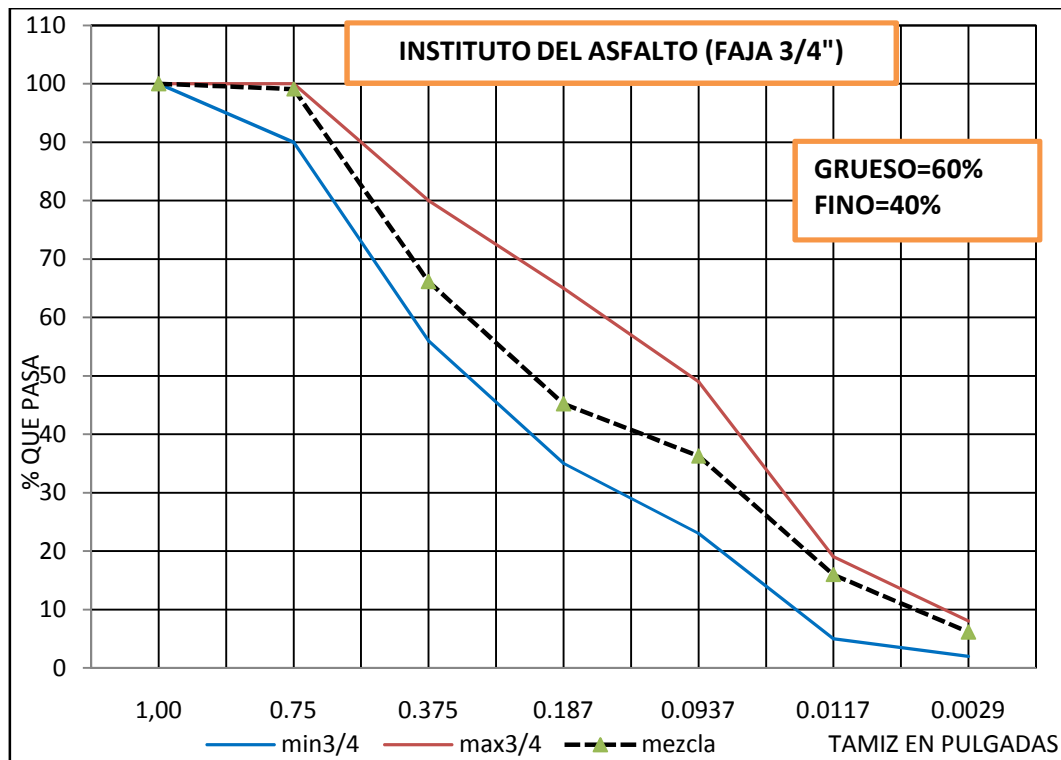


Gráfico 1: Análisis granulométrico de la mezcla de agregados (40% de agregado fino de Mulaló y el 60% de agregado grueso de Cashapamba).

En el gráfico anterior los tamaños de los tamices se muestran en el eje de las abscisas en pulgadas, el porcentaje del material que pasa se muestra en el eje de las ordenadas. Las especificaciones para esta investigación son las dadas por el MTOP mostradas en la tabla 4, para una granulometría de $\frac{3}{4}$ ", y están representadas por la región que está entre líneas sólidas delgadas. La mezcla de diseño está representada por la línea entrecortada.

5.1.2 DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA.

Se han desarrollado algunos métodos de proporcionamiento de asfalto y agregado para una mezcla de hormigón asfáltico en caliente, siendo los más conocidos los siguientes Marshall, Hveem, Hurbbard-Field y Triaxial de Smith.

Para el diseño de las briquetas en la presente investigación se utilizara el método Marshall que es el más aplicado.

5.1.2.1 METODO MARSHALL (ASTM D-1559).

Esta norma describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas para pavimentación. El procedimiento puede emplearse tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas.

Este método consiste en moldear briquetas con la mezcla de agregados y asfalto en caliente. Estas briquetas dispuestas en serie y cada serie con diferentes porcentajes de asfalto, se las moldea una vez que los materiales (agregados y asfalto) hayan sido aprobados según sus respectivas especificaciones de calidad, tamaño, etc.

5.1.2.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

- Para determinar el contenido óptimo de asfalto se prepararán 5 grupos de briquetas para la mezcla de agregados, de forma que en las curvas que representen los resultados de los ensayos muestren un valor óptimo bien definido, cada grupo con diferente contenido de asfalto. Este contenido variara con incrementos de 0.5% de un grupo a otro grupo.
- Para fijar el contenido de asfalto a emplear en estos ensayos de laboratorio, primero se debe estimar aproximadamente el contenido teórico óptimo de asfalto, para esto se utiliza la fórmula empírica (Ecuación N°11), del Instituto del Asfalto, para así partir con dos contenidos de asfalto por encima y dos por debajo del valor teórico.

Ecuación N° 11. Determinación de la Cantidad Aproximada de Asfalto.

$$\%A = 0.035a + 0.045b + K.c + F$$

Donde:

%A= % de asfalto en la mezcla.

a =% Retenido tamiz N°8.

b = % Pasante tamiz N°8.

c= % de agregado que pasa la malla N°200.

K = 0.15 si el % que retiene el tamiz 3/4" está entre 11% y 15%.

0.18 si el % que retiene está entre 6% y 10%.

0.20 si el % que retiene es el 5% o menos.

F= de 0 a 2% que varía según la absorción del material.

CÁLCULO:

$$\%A = 0.035a + 0.045b + K.c + F$$

$$\%A = 0.035(63.7) + 0.045(36.3) + (0.2). (6.1) + (1.09) \Rightarrow \%A = 6.17 \%$$

Para el valor de K se tomara 0.2, ya que el retenido en el tamiz 3/4" es 0.9%

Para el valor de F se calcula el % de absorción de la mezcla de agregados.

% de absorción de la mezcla de agregados = $(0.6)(0.982) + (0.4)(1.240) = 1.09$

Los porcentajes de asfalto con los que se trabajara para los diferentes grupos de briquetas son el 5%, 5.5%, 6%, 6.5% y 7%.

Para obtener resultados adecuados se realizaran tres briquetas para cada contenido de asfalto.

Equipo

- Compactadora mecánica de briquetas.
- Martillo de compactación.
- Dispositivo para moldear probetas.
- Extractor de probetas.
- Balanza eléctrica $A \pm 0.01$ gr.
- Bandejas metálicas.
- Placa de calentamiento.
- Termómetro blindado.
- Espátula.
- Medidor de la estabilidad.
- Mezcla de agregados (40% de agregado fino de Mulaló y el 60% de agregado grueso de Cashapamba).
- Asfalto.

Procedimiento.

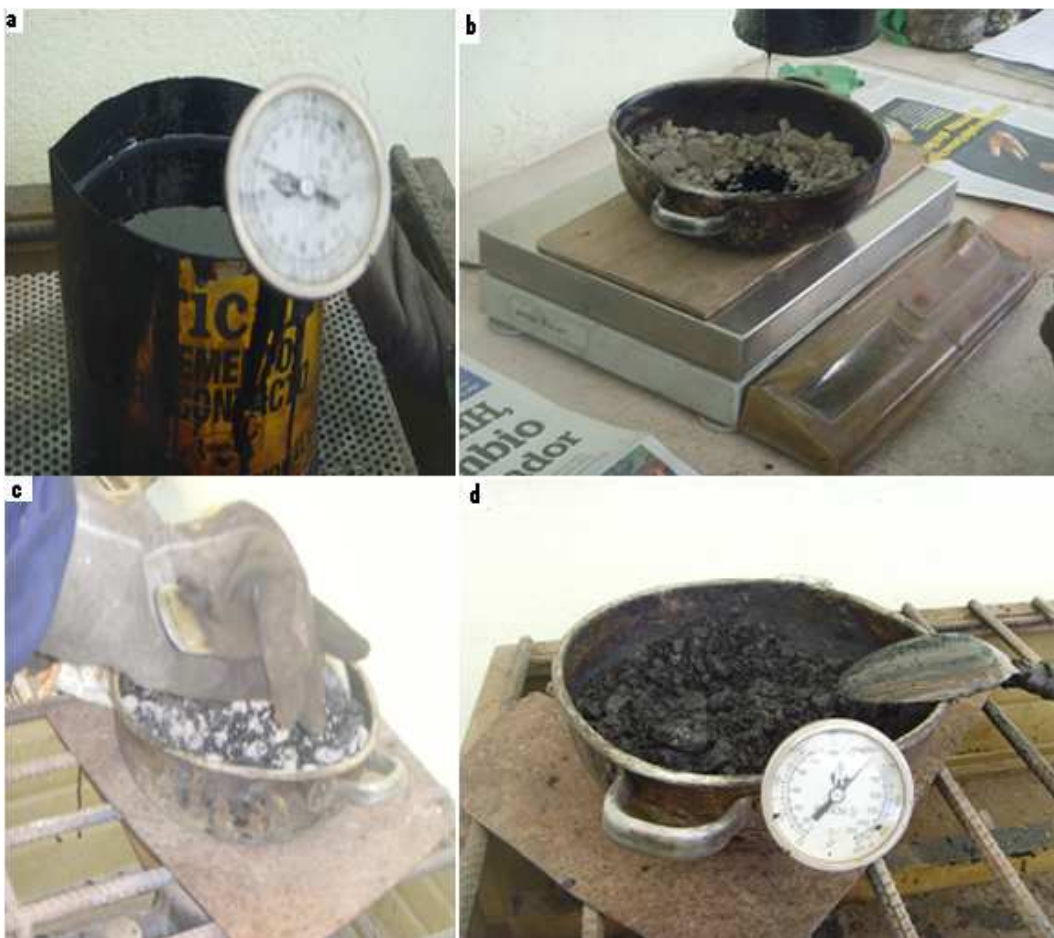
Antes de preparar la mezcla, el conjunto del molde y la base de compactación se limpian y calientan a una temperatura entre 100 y 150°C.

Por un lado se pesan en bandeja separadas las diversas fracciones de áridos calculado para un grupo de briquetas, luego cada bandeja es colocada en la placa de calentamiento para calentar su contenido a una temperatura de 175 a 190 °C.

Por otro lado se calienta el cemento asfáltico a una temperatura de 120 a 137°C (ver Fotografía 38a). Durante su calentamiento el agregado y sobre todo el asfalto deben agitarse para evitar sobrecalentamientos locales.

Se pesan luego sobre una bandeja las diversas fracciones de áridos de acuerdo con los pesos acumulativos .Se mezclan perfectamente los agregados y se forma un cráter en la mezcla, se coloca la bandeja sobre la balanza y se vierte sobre los agregados el asfalto caliente (ver Fotografía 38b), hasta completar el peso total de agregados más asfalto calculado para un porcentaje de la mezcla total.

Se mezcla el asfalto con los agregados (ver Fotografía 38c), hasta tener una mezcla homogénea, la temperatura de la mezcla no debe ser inferior a 107°C ni en ningún caso someterse a recalentamiento (ver Fotografía 38d).



Fotografía 38 : Preparación de la muestra .

Se compacta la mezcla en un molde abierto por ambos extremos y que tienen 4" de diámetro interior y 3" de altura. La compactación se hace usando un martillo especial compuesto de:

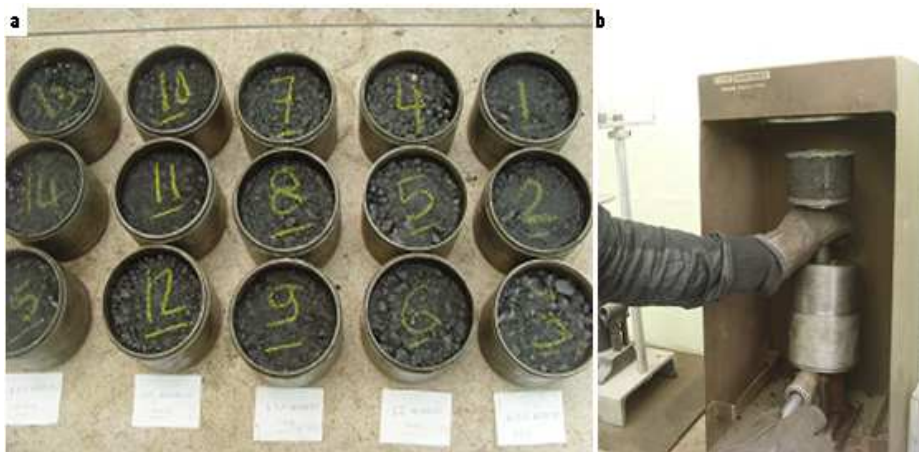
Un disco circular de 3 7/8" de diámetro que se fija sobre la superficie de la mezcla a compactarse; un martillo en forma de cilindro hueco que se desliza a lo largo de una guía y cae sobre el disco, el peso del martillo es de 10 libras y la altura de caída libre es de 18"(ver fotografía 39).



Fotografía 39: Fabricando briquetas mecánicamente.

Para el diseño de esta mezcla se aplicaron 75 golpes por cada cara en la compactación, proyectadas para vías de tráfico pesado y se Fabricaron 15 briquetas (ver Fotografía 40a).

El molde, conteniendo la briqueta se dejo enfriar a temperatura ambiente durante una noche y luego se extrajo la briqueta mediante un gato hidráulico (ver Fotografía 40b).



Fotografía 40: Extracción de las briquetas.

5.1.2.3 PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO.

Luego de extraer las briquetas de los moldes se somete cada una a los siguientes ensayos.

- a) Determinación del peso específico “BULK” (densidad aparente).
- b) Ensayo de Estabilidad y flujo.
- c) Determinación de la densidad máxima teórica.

Los resultados de cada uno de estos ensayos se encuentran en la Tabla 7.

5.1.2.3.1 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE.

Esta determinación se realiza tan pronto como las briquetas recién compactadas se han enfriado a la temperatura ambiente, la densidad aparente de las briquetas se determina calculando la relación entre su peso en aire y el peso en agua.

La densidad aparente viene dada por la fórmula:

Ecuación N° 12. Densidad Aparente.

$$D = \frac{Pa}{Pa - Pag}$$

Donde:

Pa = Peso de la probeta en el aire en gramos.

Pag = Peso de la probeta en el agua en gramos.

5.1.2.3.2 ENSAYO DE ESTABILIDAD Y FLUJO.

Antes del ensayo, se sumerge las briquetas en baño de agua a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140 \pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{F}$) durante un tiempo no inferior a 30 minutos ni mayor a 40 minutos.

Se limpian perfectamente las superficies interiores de las mordazas. La temperatura de las mismas se debe mantener entre $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (70 a $100\text{ }^{\circ}\text{F}$). Si es inferior, deberán calentarse en baño de agua hasta alcanzar la temperatura indicada. Se lubrican las varillas de guía con una película delgada de aceite de tal forma que la mordaza superior deslice fácilmente sin pegarse. Se debe verificar previamente a la aplicación de la carga que el indicador del dial del anillo de carga se encuentre en la posición correspondiente a cero.

Se coloca la briqueta en las mordazas y aplica la carga, a una velocidad de deformación constante de 50.8 mm por minuto (2" / minuto) hasta que se produce la rotura. El punto de rotura se define por la carga máxima obtenida. El número total de libras necesarias para producir la rotura de la muestra a 60 °C (150 °F) se anota como valor de ESTABILIDAD MARSHALL.

Mientras se realiza el ensayo de Estabilidad, se mantiene firmemente el medidor de deformaciones (Flujo) en posición sobre la varilla de guía (ver Fotografía 41) y se lo quita cuando se obtiene la carga máxima; se lee y anota esta lectura como valor de flujo de la briqueta, expresado en centésimas de pulgada.



Fotografía 41: Ensayo Marshall Diales de Estabilidad y Flujo.

5.1.2.3.3 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD MÁXIMA TEÓRICA.

Para determinar la densidad máxima teórica se utilizó el Ensayo Rice.

ENSAYO RICE (ASTM D-2041).

Este ensayo sirve para determinar la gravedad y densidad máxima teórica de las mezclas asfálticas no compactadas a una temperatura de 25 °C.

Equipo

- Frasco volumétrico capacidad 2000ml.
- Balanza $A \pm 0.01$ gr.
- Termómetro.
- Muestra de ensayo.

Procedimiento.

Para este ensayo primero se debe calibrar el frasco para determinar exactamente el peso del agua a 25°C que pueda llenarlo (ver Fotografía 42a), anotar este valor como A.

Las muestras preparadas con diferentes porcentajes de asfalto son enfriadas a temperatura ambiente (ver Fotografía 42b), para luego ser pesadas designando este peso de la muestra como B.

Agregar agua suficiente aproximadamente a 25°C (ver Fotografía 42c) para cubrir la muestra.

Remover el aire atrapado sometiendo todos los contenidos a un vacío parcial de 30mm de Hg(4 Kpa) o menor de presión absoluta, durante un periodo de 5 a 15 minutos, agitar el recipiente con los contenidos , a intervalos de alrededor de 2 minutos, inmediatamente después de la remoción del aire atrapado, proceder a llenar el frasco con agua y llevar sus contenidos a una temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$,determinar el peso del recipiente y los contenidos completamente llenos (ver Fotografía 42d) designar este peso como C.

CÁLCULOS:

$$d_{max} . t. = \frac{A}{A + B - C}$$

DONDE:

A = Peso de la muestra seca en el aire, en (gr).

B = Peso del recipiente lleno con agua a 25 °C (77°F), en (gr).

C = Peso del recipiente lleno con agua y muestra a 25°C (77°F), en (gr).



Fotografía 42: Ensayo Rice.

Resultados:

Mezcla de agregados (40% de agregado fino de Mulaló y el 60% de agregado grueso de Cashapamba).

% asfalto	Peso de la muestra en gr.(A)	Peso de frasco + agua a 25°C, en gr.(B)	Peso de frasco +muestra + agua a 25 ° C ,en gr.(C)	$\text{RICE} = \frac{A}{A+B-C}$
5,0	944,0	5271,3	5817,3	2,372
5,5	954,0	5365,7	5914,1	2,352
6,0	967,0	5187,5	5741,3	2,340
6,5	958,0	5178,8	5725,6	2,330
7,0	959,0	5192,8	5738,4	2,320

5.1.2.4 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO.

Una vez que se determinó, la densidad aparente, la densidad máxima teórica, la estabilidad y el flujo con cada una de las briquetas correspondientes a los 5 grupos cuyos contenidos de asfalto varían en 0.5 % se procede a tabular los resultados y complementar los datos con otros valores calculados como son:

Ecuación N° 13. Peso Específico Promedio de Agregados.

$$G = \frac{P1 + P2 + \dots + Pn}{\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \dots + \frac{Pn}{Gn}}$$

Donde:

G = Gravedad específica promedio.

G1, G2,, Gn = Valores de gravedad específica por fracción 1, 2,, n

P1, P2,, Pn = Porcentaje en pesos de la fracción 1, 2,, n.

Cálculos:

Mezcla de agregados (40% de agregado fino de Mulaló y el 60% de agregado grueso de Cashapamba).

$$\frac{\frac{100}{\frac{60}{2,491} + \frac{40}{2,452}}}{1} = 2,475 \text{ Gravedad específica de la mezcla de agregados.}$$

Ecuación N° 14. Volumen de Agregado en Porcentaje

$$V_{agr} = \frac{\% \text{ agregados} * G_b}{G_{agr}}$$

Donde:

V_{agr}= Volumen de agregado en porcentaje.

G_b = Gravedad específica del cemento asfáltico.

G_{agr} = Gravedad específica de los agregados.

Se calcula el porcentaje de vacíos con aire respecto al volumen total de la probeta.

Ecuación N° 15. Volumen de Vacíos Total en Porcentaje.

$$V_v = \left(1 - \frac{G_{bp}}{G_{mm}} \right) * 100$$

Donde:

V_v = Volumen de vacíos llenos de aire.

G_{bp} = Gravedad específica “bulk” promedio de las briquetas.

G_{mm} = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (RICE), no incluye los vacíos de aire.

Se calcula el porcentaje en volumen del cemento asfáltico

Ecuación N° 16. Volumen de Cemento Asfáltico en Porcentaje.

$$V_{ca} = 100 - V_{agr} - V_v$$

Donde:

V_{ca} : Volumen de cemento asfáltico.

V_{agr} = Volumen de agregado en porcentaje.

V_v = Volumen de vacíos llenos de aire.

Se determina el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM).

Ecuación N° 17. Volumen de Vacíos en el Agregado Mineral (V.A.M.).

$$VAM = 100 - V_{agr}.$$

Se calcula el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA).

Ecuación N° 18. Volumen de Vacíos llenos de Asfalto (V.F.A.)

$$VFA = \frac{VAM - V_v}{VAM} * 100$$

Se determina el contenido de asfalto efectivo, P_{be} , de la mezcla que es el contenido total de asfalto menos la cantidad de asfalto que absorbió el agregado.

Ecuación N° 19. Porcentaje de Asfalto Efectivo en la Mezcla.

$$Pbe = Pb - \frac{Pba * Ps}{100}$$

Donde:

Pbe = Contenido de asfalto efectivo, porcentaje por peso total de la mezcla.

Pb = Contenido de asfalto, porcentaje del peso total de la mezcla.

Ps = Contenido de agregado, porcentaje por peso total de la mezcla.

Pba = Asfalto absorbido, porcentaje por peso del agregado.

Estabilidad corregida para cada probeta.

La estabilidad leída en el ensayo se corrige en función del volumen de cada probeta con el factor tomado del ANEXO 1 y ANEXO 2.

Obtenido todos estos valores como se indican en la Tabla 8 se procedió a dibujar las curvas correspondientes a las siguientes relaciones.

- Porcentaje de Asfalto vs. densidad de la probeta.
- Porcentaje de Asfalto vs. porcentaje de vacíos en aire con respecto a la mezcla total.
- Porcentaje de Asfalto vs. vacíos de agregado mineral (VAM)
- Porcentaje de Asfalto vs. porcentaje de vacíos llenos de Asfalto (VFA).
- Porcentaje de Asfalto vs. estabilidad corregida.
- Porcentaje de Asfalto vs. Fluencia (flujo).

Una vez dibujadas estas curvas como se puede observar en el gráfico 2 se determina en cada caso (excepto en la curva del flujo) el porcentaje óptimo de asfalto, obteniendo los cinco porcentajes óptimos se establece el promedio, estos resultados serán analizados y comparados con las especificaciones de la MTOP en el capítulo 6.

**TABLA 8: MEZCLA ASFÁLTICA (40% DE AGREGADO FINO DE MULALÓ Y EL 60% AGREGADO GRUESO DE CASHAPAMBA),
MÉTODO MARSHALL**

Nº GOLPES 75

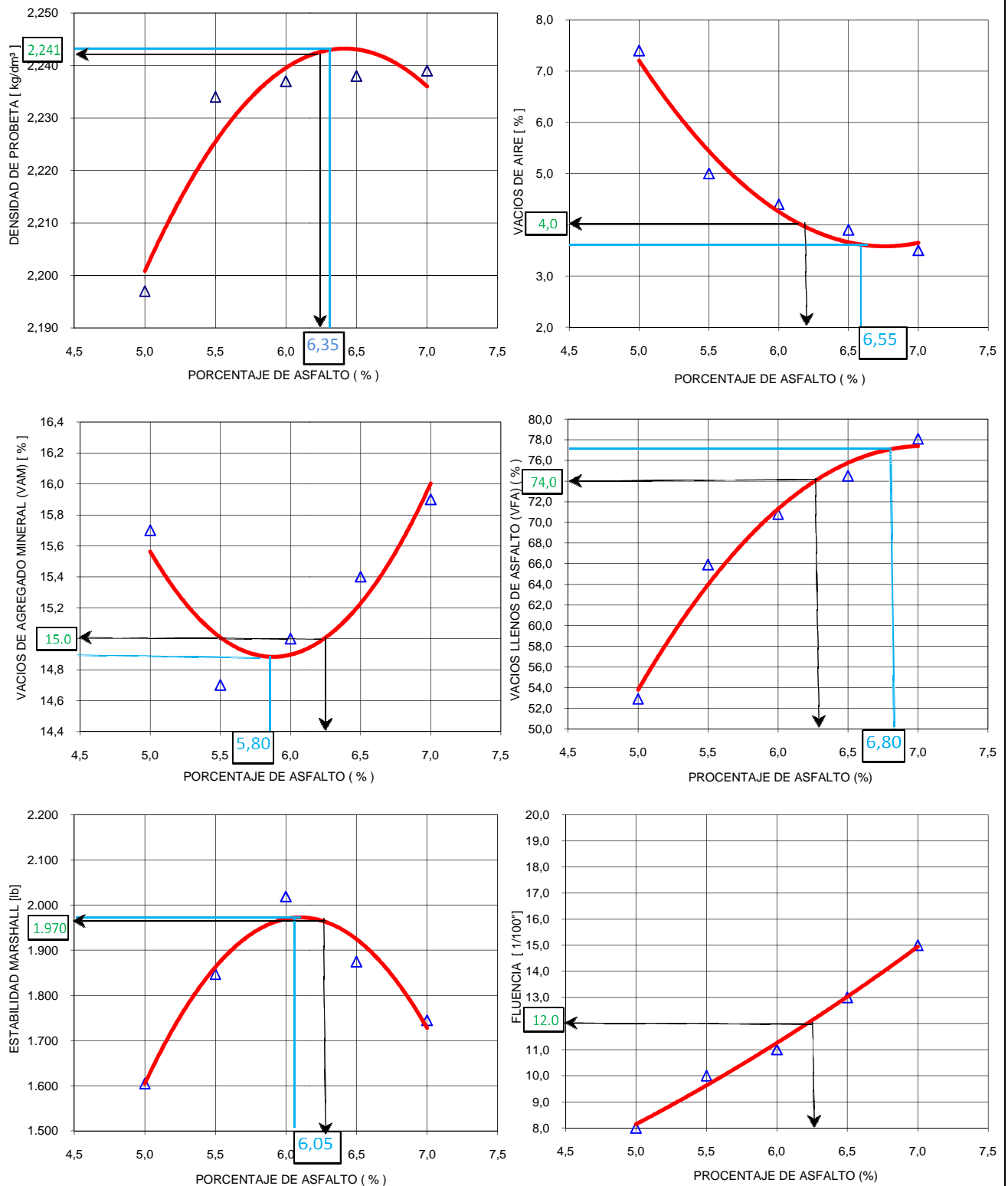
G.E. DEL C.A : 1.012

PENETRACIÓN DEL ASFALTO: 60-70

G.E. AGREGADOS PARA DISEÑO: 2.475

b	P E S O (gramos)					PESO ESPECIFICO		VOLUMEN - % TOTAL			V.A.M.	VFA	Estabilidad (Kg.)				
% asfalto		Seca Aire	S.S.S. Aire	En Agua	Volúmen	"Bulk"	Rice	Agregados	Vacios en aire	Asfalto efectivo			Dial	Medida	Factor de Corrección	Corregida	Flujo
	B	d	e	f	v	g	i	k	l	m	n	ñ	o	q	r	s	t
	No.				e -f	d/v	RICE	$\frac{(100 - b)g}{G_{agr}}$	$[1 - (g/i)] * 100$	100 - k - i	100 - k	$\left(\frac{n - l}{n}\right) * 100$					1/100"
5,0	1	943	950	521	429	2,198							342	1149	1,39	1597	7
	2	948	957	525	432	2,194							350	1176	1,32	1552	8
	3	943	953	524	429	2,198							357	1199	1,39	1667	8
	PROMEDIO =					2,197	2,372	84,3	7,4	8,3	15,7	52,9				1605	8
5,5	4	950	954	528	426	2,230							413	1386	1,39	1927	10
	5	950	953	528	425	2,235							379	1272	1,39	1768	9
	6	953	956	530	426	2,237							329	1106	1,67	1847	10
	PROMEDIO =					2,234	2,352	85,3	5,0	9,7	14,7	65,9				1847	10
6,0	7	954	956	528	428	2,229							431	1446	1,39	2010	10
	8	959	959	530	429	2,235							445	1492	1,39	2074	13
	9	944	946	526	420	2,248							400	1342	1,47	1973	10
	PROMEDIO =					2,237	2,340	85,0	4,4	10,6	15,0	70,8				2019	11
6,5	10	967	968	539	429	2,254							403	1352	1,39	1879	14
	11	959	960	532	428	2,241							415	1392	1,39	1935	12
	12	970	971	534	437	2,220							409	1372	1,32	1811	13
	PROMEDIO =					2,238	2,330	84,6	3,9	11,5	15,4	74,5				1875	13
7,0	13	969	969	535	434	2,233							387	1299	1,32	1715	15
	14	965	965	536	429	2,249							381	1279	1,39	1778	14
	15	966	967	535	432	2,236							393	1319	1,32	1741	15
	PROMEDIO =					2,239	2,320	84,1	3,5	12,4	15,9	78,1				1745	15

Gráfico 2 : Curvas de diseño de la mezcla asfáltica (40% de agregado fino de Mulaló y el 60% de agregado grueso de Cashapamba) - Carpeta (faja 3/4") Metodo Marshall.



RESUMEN :
PORCENTAJE ÓPTIMO 6.3%
DENSIDAD 2,241 Kg/dm³
V.A.M 15,0%
ESTABILIDAD 1970 Kg

CÁLCULO $(6,35+6,55+5,8+6,8+6,05=31,55 \rightarrow 31,55/5=6,31)$
VACIOS DE AIRE 4,0%
V.F.A 74 %
FLUENCIA 12,0 (1/100")

5.2 ENSAYO DE CONTENIDO ASFÁLTICO (ASTM D-2172).

Este ensayo se lo realiza mediante una máquina centrífuga para medir el contenido de asfalto de la mezcla, y también comprueba la cantidad del uso de asfalto en la construcción del pavimento.

Equipo

- Horno.
- Recipientes metálicos.
- Balanza eléctrica A ± 0.01 gr.
- Vaso graduable de 1000 ml de capacidad.
- Aparato de extracción.
- Anillo filtrante.
- Gasolina.
- Muestra.

Procedimiento.

Para la preparación de la muestra, si la mezcla no es suficientemente blanda para separarla con una espátula, se la coloca en una bandeja y se calienta a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$) hasta que pueda manejarse o mezclarse. Se cuartea el material hasta que se obtenga el peso del material requerido para el ensayo (W1).

Colocar la porción de la muestra de ensayo en la taza y cubrir con gasolina, dejar el tiempo suficiente para que el disolvente desintegre la porción de ensayo (no más de 1 hora). Colocar la taza que contiene la porción de ensayo y el solvente en el aparato de extracción (ver Fotografía 43a). Secar y determinar el peso del anillo filtrante y ajustar alrededor del borde de la taza (ver Fotografía 43b). Apretar la tapa firmemente sobre la taza y colocar un vaso graduado bajo el desagüe para recoger el extracto.

Iniciar la centrifugación girando lentamente y aumentar gradualmente la velocidad a un máximo de 3600 rpm, hasta que deje de fluir el solvente por el desagüe. Dejar que se detenga la máquina y agregar 200 ml (o más como sea apropiado para el peso de la muestra) del solvente empleado, y repetir el procedimiento (ver Fotografía 43c).

Emplear suficientes adiciones de solvente (no menos de tres) de manera que el extracto no sea más oscuro que un color ligero de paja. Recoger el extracto y las lavaduras en un recipiente apropiado.

Remover el anillo filtrante de la taza y secar al aire (ver Fotografía 43d). Si se emplean anillos filtrantes de fieltro, cepillar la materia mineral adherida a su superficie y agregar al material

extraído. Secar el anillo hasta peso constante en un horno a $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230^{\circ} \pm 9^{\circ}\text{F}$). Verter cuidadosamente todo el contenido de la taza en una cazuela metálica luego secarla hasta peso constante en un horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$).

El peso del agregado extraído (W3) es igual al peso del agregado en la cazuela metálica más el aumento en el peso que experimenten los anillos filtrantes.



Fotografía 43: Ensayo del contenido asfáltico.

Resultados:

Ecuación N° 20. Contenido de Asfalto.

$$\% A = \frac{(W1 - W2) - (W4 - W3)}{W1} * 100$$

Donde:

W1 = Peso inicial de la muestra.

W2 = Peso final de la muestra.

W3 = Peso inicial del filtro.

W4 = Peso final del filtro.

Aplicando esta ecuación al ensayo realizado se obtuvo:

$$\% A = \frac{(443 - 415.62) - (20.94 - 19.81)}{443} * 100 = 5,93\%$$

5.3 ENSAYO DE RECUBRIMIENTO Y PELADURA DE ASFALTO EN AGREGADOS (ASTM D - 3625).

Este ensayo describe el procedimiento que debe seguirse para valorar, en forma empírica, el efecto de la acción del agua sobre la película asfáltica que recubre un agregado, mediante un ensayo de adhesividad pasiva (stripping), que intenta poner de manifiesto la afinidad recíproca entre ambos materiales.

También, podrá utilizarse para juzgar un agregado con respecto a un ligante asfáltico tipo o para juzgar un asfalto con respecto a un agregado tipo. Así mismo, se puede emplear para valorar la acción de los aditivos que se utilicen para mejorar la adhesividad (cubrimiento).

Equipo

- Tamices (3/8", N°4)
- Balanza eléctrica A \pm 0.01 gr.
- Recipiente, de vidrio del tipo “beaker” de capacidad 500 ml.
- Dispositivo calentador.
- Cuchara.
- Agua.
- Termómetro.
- Asfalto.
- Aditivo REDICOTE AP.
- Agregado.

Procedimiento.

Este ensayo consiste básicamente en realizar una mezcla con 100 gramos de agregado seco que pasa el tamiz 3/8 de pulgada y retiene el N°4 con un 5.5% de asfalto, el material asfáltico se mezcla vigorosamente hasta que las partículas de agregado queden totalmente recubiertas (ver

Fotografía 44). Se deja enfriar esta mezcla durante 1 o 2 horas aproximadamente a temperatura ambiente, luego de esto se la coloca en un vaso de vidrio con agua con capacidad de 500 cm³.



Fotografía 44: Material Cubierto Totalmente con Asfalto.

Se procede a hervir el agua con la mezcla con un incremento de temperatura de 5°C por minuto (ver Fotografía 45), una vez que hierva el agua dejamos que se mantenga así por 10 minutos.



Fotografía 45: Incremento de temperatura de 5°C por minuto.

El resultado de este ensayo es de caracterización visual de acuerdo a la cantidad de asfalto desprendido de las partículas de agregado.

En el presente estudio se utilizó este ensayo para verificar si es o no necesario la adición del aditivo adherente, se comparo utilizando el aditivo REDICOTE AP que tiene las propiedades físicas que se indican en la tabla 9, con una dosificación de 0.3%.

Apariencia a 25°C	Líquido café oscuro				
Punto de Fluidez, °C	<-5				
Punto de Inflamación , °C	>200				
	10	20	30	40	°C
Viscosidad, mPa.s(cP)	2700	1250	630	300	
Densidad, g/cc	1.01	1.01	1.00	0.99	

Tabla 9. Propiedades físicas del aditivo REDICOTE AP.

Resultados:

Mediante observación se pudo estimar que el porcentaje del área visible total del agregado que retiene su cubrimiento original, tanto la mezcla con aditivo, como sin aditivo es superior al 95% (ver Fotografía 46), razón por la cual no es necesario la adición del aditivo de adherencia.



Fotografía 46: Estimación del porcentaje de asfalto que cubre las partículas.

5.4 ENSAYO CÁNTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE (NLT – 159/86).

El ensayo cántabro sirve para la determinación del valor de la pérdida por desgaste de las mezclas asfálticas empleando la Máquina de Los Ángeles. El procedimiento se puede emplear tanto en el proyecto de mezclas en laboratorio, como para el control en obra de las mismas. Este método fue desarrollado por los españoles con la finalidad de facilitar el desarrollo y optimización de la composición y comportamiento de las mezclas asfálticas, la normativa española **NLT-159/86** actual, establece que la pérdida por desgaste en el ensayo cántabro a 25°C debe ser menor que el 25% en peso, norma para la cual se regió este estudio .

El procedimiento se aplica a las mezclas asfálticas fabricadas en caliente y de granulometría abierta, cuyo tamaño máximo sea inferior a 25 mm.

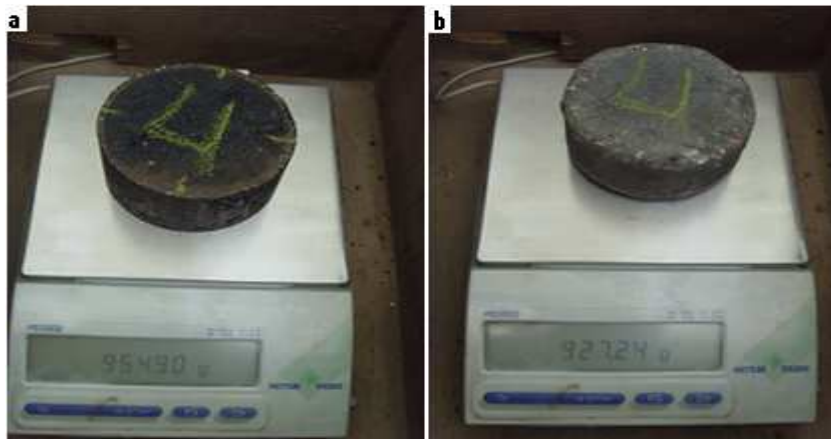
El ensayo permite valorar directamente la cohesión, trabazón, así como la resistencia a la disgregación de la mezcla, ante los efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico.

Equipo

- Máquina de los Ángeles.
- Termómetro.
- Balanza eléctrica A ± 0.01 gr.
- Cámara termostática.
- Briquetas.

Procedimiento.

Este ensayo consiste en medir el peso en aire de una briqueta Marshall que está a $25^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura, e inmediatamente introducirla en la máquina de los Ángeles, y sin ningún tipo de carga abrasiva someterla a 300 revoluciones del tambor, durante el ensayo la briqueta de mezcla se va erosionando y desgastando lo que al final del ensayo genera una pérdida de peso de la briqueta como se muestra en la fotografía 47.



Fotografía 47: (a) Briqueta Marshall antes del ensayo, (b) después de ser sometida a Ensayo Cántabro.

Resultados:

El resultado del ensayo cántabro o de pérdida por desgaste se expresa en tanto por ciento del peso inicial de la briqueta y se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación N° 23. Pérdida Por Desgaste al Cántabro.

$$\% p = \frac{PI - PF}{PI} * 100$$

Donde:

%P = Pérdida por desgaste al Cántabro.

PI = Peso inicial de la briqueta en gramos.

PF = Peso final de la briqueta en gramos.

Cabe señalar que se fabricaron briquetas con granulometría seleccionada mediante cuarteo de muestras, con la finalidad de asemejar el proceso productivo real en planta. Este ensayo es particularmente sensible a la variación de los componentes que proporcionan la cohesión y la resistencia a la disgregación de la mezcla, contenidos del ligante filler y árido fino.⁸

Para efecto de este ensayo se fabricaron 15 briquetas con mezcla modificada y 3 con mezcla convencional.

⁸ Rodríguez Gallego, Karina Liset. Mejora de una Mezcla Drenante con Incorporación de Caucho e Icopor. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería. Bogotá D.C.

5.4.1 ENSAYO CÁNTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE PARA MEZCLA CON POLIMERO EVA.

Para determinar el porcentaje óptimo del polímero EVA que se deberá adicionar a la mezcla convencional, se utilizó el ensayo cántabro como parámetro de selección para los distintos porcentajes.

Los rangos de porcentaje que se tomaron en cuenta para empezar a trabajar este ensayo, fueron obtenidos a través de experiencias pasadas en investigaciones similares.

Con la finalidad de obtener el rango de porcentaje de adición del polímero EVA sobre la mezcla, se tomó en cuenta los resultados obtenidos en la investigación realizada por Karina Rodríguez en su trabajo de graduación “MEJORA DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA DRENANTE CON ADICION DE CAUCHO E ICOPOR” En la cual indica que adiciones de caucho mayores al 5% ya no reportan mejoras en la mezcla, por lo cual para la presente investigación se trabajó con porcentajes del 1%,2%,3% 4% y 5%

Antes de trabajar este ensayo se fabricaron briquetas con la siguiente composición en porcentaje 40 por ciento de agregado fino de Mulaló, 60 por ciento de agregado grueso de Cashapamba y 6.3 por ciento de asfalto para la mezcla convencional, para las briquetas modificadas la misma composición y sumado a esto el 1, 2, 3,4 y 5 por ciento de polímero en peso de asfalto.

Se fabricaron 3 briquetas por cada porcentaje de polímero, y 3 briquetas de mezcla convencional para su posterior análisis comparativo, los resultados obtenidos de las 3 briquetas se promedian entre sí, descartando los valores evidentemente erróneos, este valor se tomará como el porcentaje de desgaste para esa dosificación, los resultados se muestra en la tabla 10 y su análisis se lo realizara en el capítulo 6.

PÉRDIDA POR DESGASTE EN PORCENTAJE (%)					
MEZCLA MODIFICADA					
% POLIMERO		PESO	PESO	PI -	%
EVA	Nº PROBETA	INICIAL	FINAL	PF	DESGASTE
1	67	952,6	925,4	27,2	2,85
	68	948,1	919,7	28,4	2,99
	69	943,7	915,6	28,1	2,97
	PROMEDIO				2,94
2	70	942,1	919,5	22,6	2,40
	71	952,4	919,4	33,0	3,46
	72	954,9	929,2	25,7	2,69
	PROMEDIO				2,55
3	1	954,9	931,4	23,5	2,46
	2	951,3	927,3	24,0	2,52
	3	938,9	910,0	28,9	3,07
	PROMEDIO				2,49
4	16	943,9	914,4	29,5	3,12
	17		922,9	16,9	1,79
	18	945,9	918,5	27,4	2,90
	PROMEDIO				3,01
5	31	938,8	895,7	43,1	4,59
	32	950,4	919,2	31,2	3,28
	33	948,9	918,7	30,2	3,19
	PROMEDIO				3,24
PÉRDIDA POR DESGASTE EN PORCENTAJE (%)					
MEZCLA CONVENCIONAL					
Nº PROBETA		PESO	PESO	PI -	%
		INICIAL	FINAL	PF	DESGASTE
G		941,5	914,2	27,35	2,9
H		944,4	914,3	30,07	3,18
I		939,6	904,4	35,2	3,75
PROMEDIO					3,04

Tabla 10. Resultados del Ensayo Cántabro para mezcla con polímero EVA y para mezcla convencional.

5.5. ENSAYO DE MÓDULO DINÁMICO ELÁSTICO (ASTM D-3497).

Este ensayo cubre procedimientos para preparar y ensayar mezclas asfálticas de pavimentos para determinar los valores del módulo dinámico o resiliente. El procedimiento descrito cubre un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencia de carga. La serie de ensayos que se realizara en esta investigación será para temperaturas de 10°, 20° y 40 °C a una misma frecuencia de carga.

Antes de trabajar este ensayo se fabricaron 45 briquetas con mezcla modificada ,9 por cada porcentaje de polímero (tres para cada temperatura) y 9 con mezcla convencional para su posterior análisis comparativo.

Equipo

- El equipo utilizado en esta investigación para la realización de estos ensayos es de tecnología COOPER TECHNOLOGY (CRT-HYD25-II Universal Servo Hydraulic Testing Machine) ,
- Calibrador A $\pm 0.01\text{mm}$
- Balanza eléctrica A ± 0.01 gr.
- Probetas

Procedimiento.

Previo a la realización del ensayo se debe medir la altura de cada briketa para lo cual debemos medir en cuatro puntos diferentes (ver Fotografía 48a), con la finalidad de obtener una altura promedio la misma que se la sirve como dato para ingresar al software.

Colocar las briquetas de ensayo en la cámara de temperatura controlada y llevar a la temperatura de ensayo especificada (ver Fotografía 48b), una vez que las briquetas han alcanzado la temperatura del ensayo permaneciendo por lo menos 24 horas dentro de la cámara triaxial, se coloca la briketa dentro del aparato de carga y se conecta los alambres para medir la deformación (ver Fotografía 48c).

Se coloca el disco de acero endurecido sobre la parte superior de la briketa y centrar los dos bajo el aparato de carga.

Una vez colocada la briketa en su posición se procede al ensayo mediante el uso de un software (ver fotografía 48d).

En la cual se aplica un esfuerzo de compresión axial sinusoidal (medio seno inverso) a la briqueta de concreto asfáltico a una temperatura y frecuencia de carga dados. Se mide la respuesta resultante recuperable de la deformación axial de la briqueta y se emplea para calcular el módulo dinámico.



Fotografía 48: Ensayo Dinámico utilizando el equipo de tecnología COOPER TECHNOLOGY (CRT-HYD25-II Universal Servo Hydraulic Testing Machine).

El sistema de medida consiste en un registrador de dos canales, dispositivos para la medida del esfuerzo y de la deformación, una señal de amplificación adecuada y equipo de excitación.

El sistema de medida tiene capacidad para determinar cargas hasta de 13.3 KN (3.000 lbs.) a partir de un registrador con sensibilidad mínima del 2% de la carga de ensayo por milímetro del papel del gráfico. El sistema también tiene capacidad para determinar deformaciones en un intervalo de resultados registrados de 300 a 5000 de micro unidades de deformación. Para el caso de



sensibilidad mayor, el sistema es capaz de exhibir 4 unidades de micro deformación o menos por milímetro en el gráfico registrado.

La amplitud del registrador es independiente de la frecuencia para ensayos llevados hasta 20 Hz.

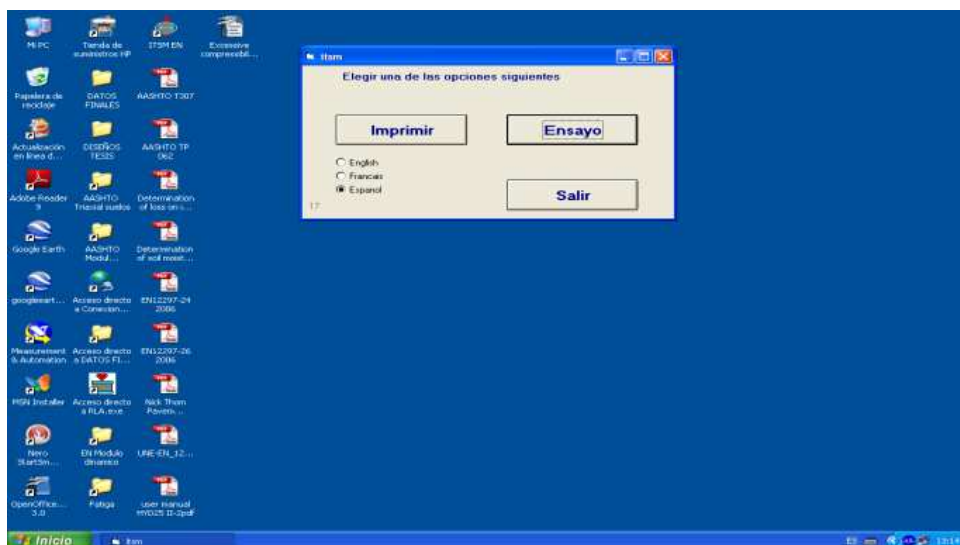
Los valores de la deformación axial se miden adhiriendo dos deformímetros de alambre a la mitad de la altura opuesto el uno del otro, sobre las briquetas. Los deformímetros se conectan en un circuito de puente de Wheatstone con dos deformímetros activos sobre las briquetas de ensayo y dos medidores para compensar temperatura sobre una briquea no sometida a esfuerzos y expuesta al mismo ambiente que la briquea de ensayo. Los medidores compensadores de temperatura, deberán hallarse en la briquea no sometida a ensayo en la misma posición que los deformímetros en la briquea de ensayo.

Las cargas son medidas con una celda electrónica de carga que cumpla con los requerimientos para medidas de carga y esfuerzos.

5.5.1. MODO DE USO DEL SOFTWARE.

Se corre el programa ITSM EN, el cual en cada ventana suministra información sobre el paso que se debe realizar, a continuación se da una breve descripción de los cuadros de dialogo. Para salir del ensayo en cualquier punto se pulsa la tecla salir  , para pasar a la ventana siguiente continuar  .

Ventana 1: Una vez que se corre el programa se selecciona el idioma y pulsamos la tecla Ensayo.



Ventana 2: En esta ventana se observa 4 pasos para la correcta colocación de la briqueta y del marco de deformación.

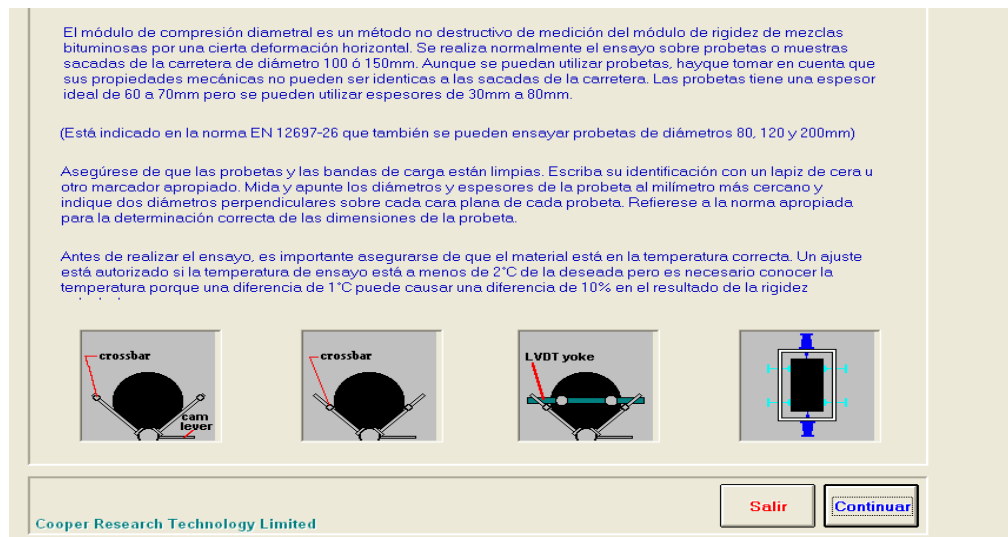


Figura 13. Ventana 2.

Ventana 3: Se selecciona el nombre del operador responsable, si es usuario nuevo se debe agregar a la lista.



Figura 14. Ventana 3.

Ventana 4: Se escriben los datos tanto de temperatura, diámetro, espesor, coeficiente de Poisson del asfalto, deformación deseada y referencia de la briqueta.

Ventana 4 displays a list of test parameters with numerical input fields and a modal dialog for specimen reference.

Parámetro	Valor
Temperatura de ensayo (°C)	10.0
Diámetro de la probeta (mm)	102.0
Espesor de la probeta (mm)	73.3
Coefficiente de Poisson	0.35
Tiempo de subida deseado (ms)	124
Deformación horiz. deseada (microns)	5
Número de pulsos de preparación	10

Referencia de la probeta

Entrar la referencia de la probeta

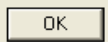
Referencia de la probeta: _____

Botones: OK, Cancel

Cooper Research Technology Limited

Botones: Salir, Continuar

Figura 15. Ventana 4.

Ventana 5: Se anotan los datos que se deseen aparezcan en el reporte como cliente, operador responsable, tipo de mezcla, método de fabricación, método de compactación, método de determinación de la densidad, condiciones de almacenamiento y densidad y pulsamos  .

Ventana 5 displays a form for entering report details and a modal dialog for apparent density.

Entrar los detalles que se tienen que guardar e imprimir en el informe.

No. De serie del informe de: Fecha de emisión del:

Nombre del cliente:

Nombre de la persona responsable del:

Tipo y origen de la mezcla bituminosa:

Método de fabricación de la mezcla bituminosa:

Método de compactación:

Método de determinación de la densidad:

Condiciones de almacenamiento:

Densidad aparente


Densidad aparente en kg/m³

Botones: OK, Cancel

Cooper Research Technology Limited

Botones: Salir, Continuar

Figura 16. Ventana 5.

Ventana 6: Una vez que se ingresan los detalles que tiene que guardar e imprimir en el informe presionamos la tecla.  .

Entrar los detalles que se tienen que guardar e imprimir en el informe.

No. De serie del informe de	Fecha de emisión del
U	02/06/2012
Nombre del cliente	
UNIVERSIDAD CENTRAL	
Nombre de la persona responsable del	
MANUEL MARLA	
Tipo y origen de la mezcla bituminosa	
MEZCLA CONVENCIONAL	
Método de fabricación de la mezcla bituminosa	
MEZCLA EN LABORATORIO	
Método de compactación	
AUTOMATICO	
Método de determinación de la densidad	
BASICO	
Condiciones de almacenamiento	
NORMALES	

Cooper Research Technology Limited

Salir **Continuar**

Figura 17. Ventana 6.

Ventana 7: En esta ventana se muestra un sub-ventana que nos indica “Retirar el marco del LVDT y la barra superior del marco del ensayo de rigidez. Levante las palancas para subir las barras de soporte. Coloque la probeta en el medio sobre la barra inferior y ajuste las barras transversales pero que solo mantengan la probeta en su sitio sin apretar”.

Este proceso se realiza manualmente en la cámara de ensayo y pulsamos la tecla.

Aceptar

Entrar los detalles que se tienen que guardar e imprimir en el informe.

No. De serie del informe de	Fecha de emisión del
U	02/06/2012
Nombre del cliente	
UNIVERSIDAD CENTRAL	
Nombre de la persona responsable del	
MANUEL MARLA	
Tipo y origen de la mezcla bituminosa	
MEZCLA CONVENCIONAL	
Método de fabricación de la mezcla bituminosa	
MEZCLA EN LABORATORIO	
Método de compactación	
AUTOMATICO	
Método de determinación de la densidad	
BASICO	
Condiciones de almacenamiento	
NORMALES	

Cooper Research Technology Limited

Salir **Continuar**


WARNING

Retirar el marco del LVDT y la barra superior del marco del ensayo de rigidez. Levante las palancas para subir las barras de soporte. Coloque la probeta en el medio sobre la barra inferior y ajuste las barras transversales pero que solo mantengan la probeta en su sitio sin apretar.

Aceptar

Figura 18. Ventana 7.

Ventana 8: Esta ventana nos presenta una sub-ventana que nos indica “Los ajustadores para el LVDT destornillados, coloque el marco de los LVDTs sobre la probeta para que se apoye ligeramente en las barras transversales. La probeta tiene que estar en el centro del marco de LVDTs. Coloque la parte superior del sub-marco sobre la probeta y ponga la semi bola en su sitio”.

Este proceso se realiza manualmente en la cámara de ensayo y pulsamos la tecla. 



Entrar los detalles que se tienen que guardar e imprimir en el informe.

No. De serie del informe de	Fecha de emisión del
U	02/06/2012
Nombre del cliente	
UNIVERSIDAD CENTRAL	
Nombre de la persona responsable del	
MANUEL MORA	
Tipo y origen de la mezcla bituminosa	
MEZCLA CONVENCIONAL	
Método de fabricación de la mezcla bituminosa	
MEZCLA EN LABORATORIO	
Método de compactación	
AUTOMATICO	
Método de determinación de la densidad	
BASICO	
Condiciones de almacenamiento	
NORMALES	

WARNING

Los ajustadores para LVDT destornillados, coloque el marco de los LVDTs sobre la probeta para que se apoye ligeramente en las barras transversales. La probeta tiene que estar en el centro del marco de LVDTs. Coloque la parte superior del sub-marco sobre la probeta y ponga la semi bola en su sitio.


Aceptar

Salir Continuar

Cooper Research Technology Limited

Figura 19. Ventana 8.

Ventana 9: Esta ventana nos presenta una sub-ventana que nos indica “Ponga el sub-marco de módulo en posición debajo del actuador”.

Este proceso se realiza manualmente en la cámara de ensayo y pulsamos la tecla. 



Entrar los detalles que se tienen que guardar e imprimir en el informe.

No. De serie del informe de	Fecha de emisión del
U	02/06/2012
Nombre del cliente	
UNIVERSIDAD CENTRAL	
Nombre de la persona responsable del	
MANUEL MORA	
Tipo y origen de la mezcla bituminosa	
MEZCLA CONVENCIONAL	
Método de fabricación de la mezcla bituminosa	
MEZCLA EN LABORATORIO	
Método de compactación	
AUTOMATICO	
Método de determinación de la densidad	
BASICO	
Condiciones de almacenamiento	
NORMALES	

WARNING

Ponga el sub-marco de módulo en posición debajo del actuador.

Aceptar

Salir Continuar

Cooper Research Technology Limited

Figura 20. Ventana 9.

Ventana 10: La barra del bastidor se desplazara rápidamente desde su posición en el extremo superior hasta su límite superior. Se usan las flechas para bajar el actuador hasta que esté entre 5 y 10mm encima de la semi bola encima de la placa superior. Una vez en su sitio, dar un click en “Hacer Contacto”. , en unos segundos el actuador toca la semi bola y pasamos automáticamente a la ventana 11.



Figura 21. Ventana 10.

Ventana 11: Esta ventana nos muestra la salida de los sensores LVDT.

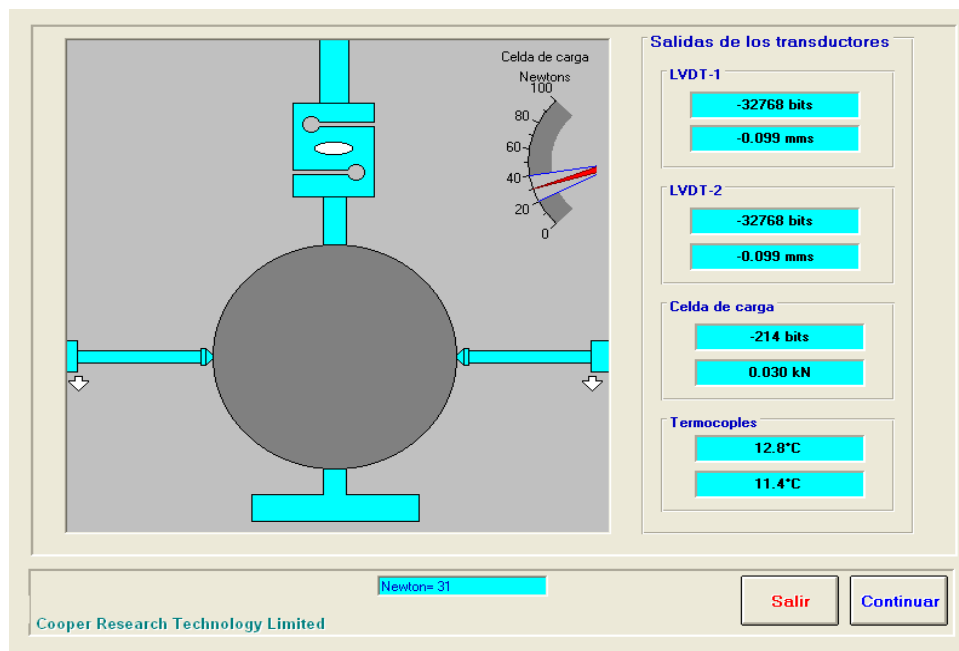


Figura 22. Ventana 11.

Ventana 12: Ajustar mediante movimiento los sensores hasta lograr que las flechas tengan un color rojo lo cual nos indican que están en contacto con la muestra. Continuar

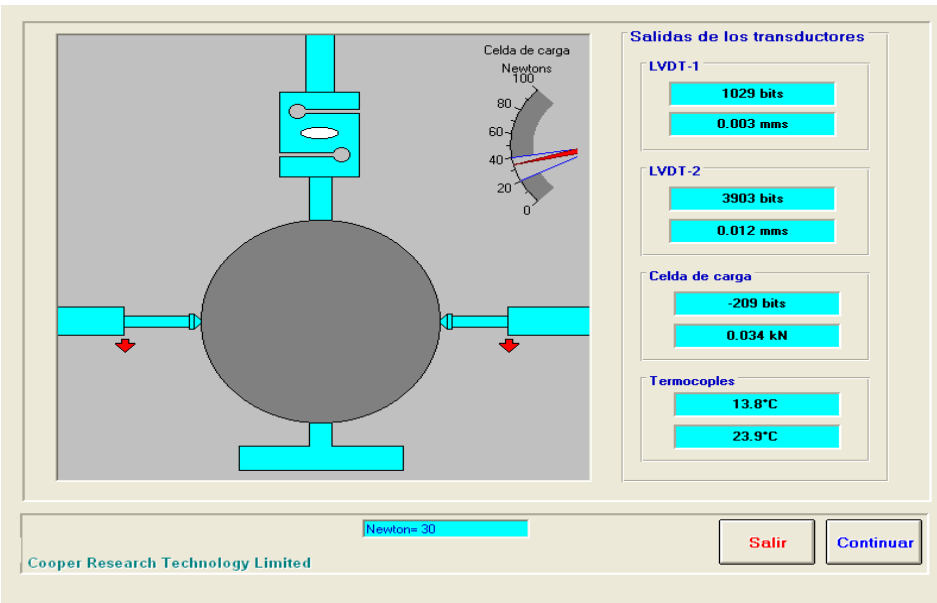


Figura 23. Ventana 12.

Ventana 13: Esta ventana nos muestra una sub- ventana que nos indica “Suba las palancas del sub-marco para bajar las barras transversales”. Así la briquea queda apoyada en las dos mordazas de carga del marco. Aceptar

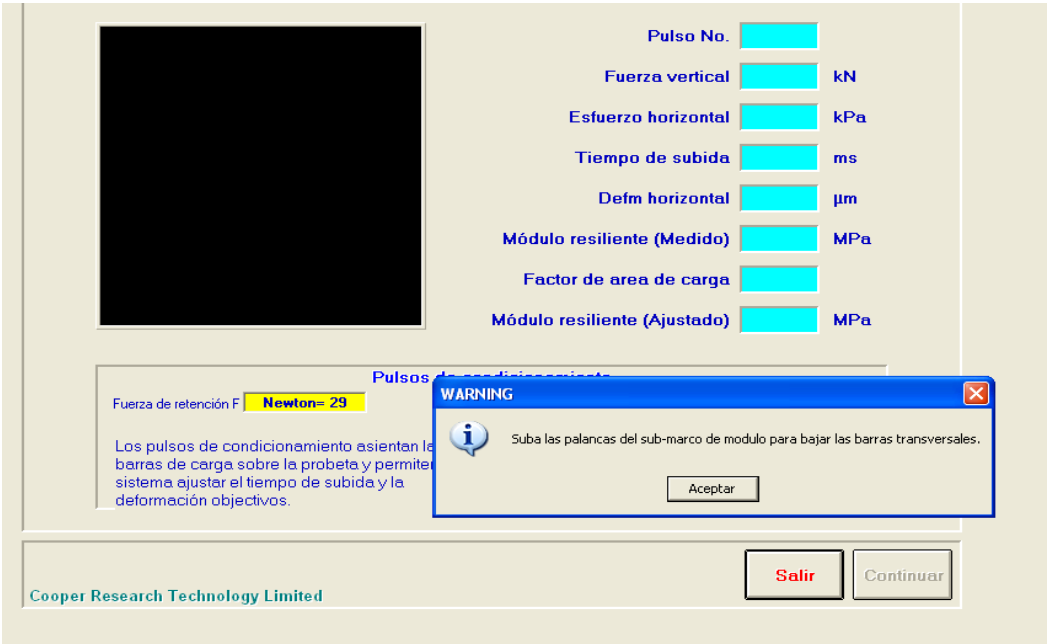


Figura24. Ventana 13.

Ventana 14: En este punto se da inicio a los pulsos de acondicionamiento los cuales asientan las barras de carga sobre la briqueta y permiten al sistema ajustar el tiempo de subida y la deformación establecidos.

Comenzar

Pulso No.

Fuerza vertical kN

Esfuerzo horizontal kPa

Tiempo de subida ms

Defm horizontal μm

Módulo resiliente (Medido) MPa

Factor de area de carga

Módulo resiliente (Ajustado) MPa

Pulsos de acondicionamiento

Fuerza de retención F **Newton= 31**

Los pulsos de acondicionamiento asientan las barras de carga sobre la probeta y permiten al sistema ajustar el tiempo de subida y la deformación objetivos.

Comenzar

Cooper Research Technology Limited

Salir Continuar

Figura 25. Ventana 14.

Ventana 15: Esta ventana muestra los resultados del acondicionamiento, que deben ser analizados para ver si el acondicionamiento logró su fin o no, para ello se debe establecer si el factor de área de carga esta dentro del rango (0.5-0.7) y la deformación horizontal se iguala a la deformación horizontal establecida.

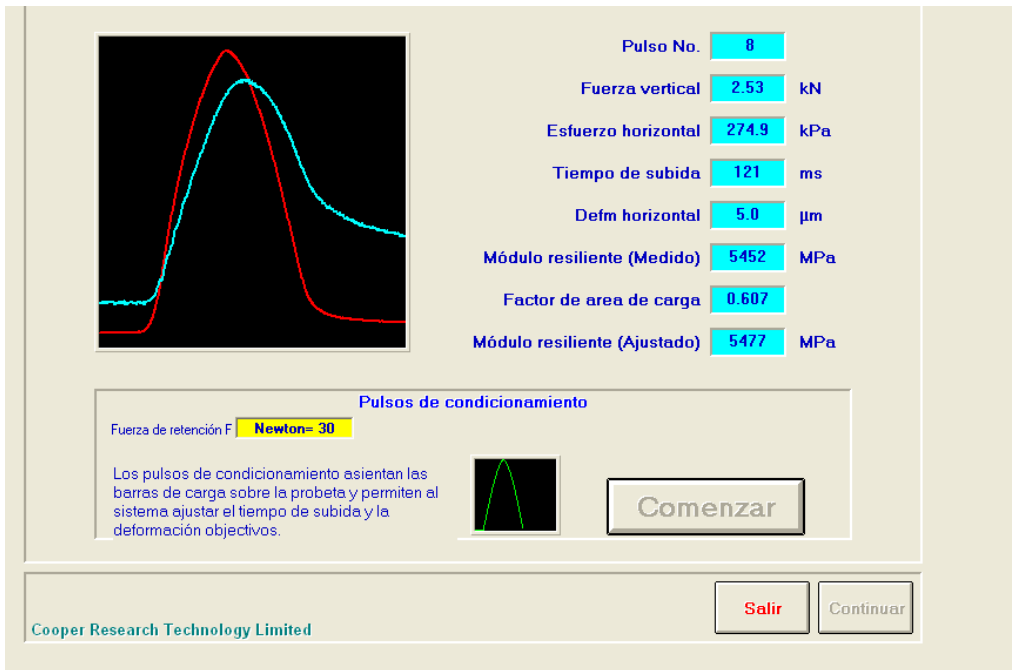


Figura 26. Ventana 15.

Ventana 16: se realiza nuevamente la comprobación de la posición de los sensores descrita en la ventana12. Continuar

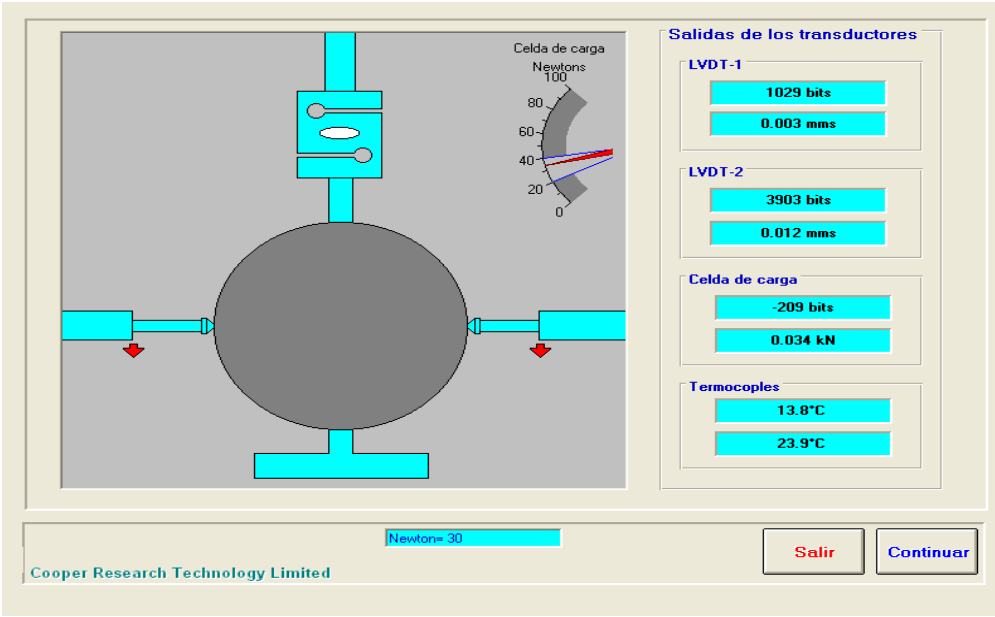


Figura 27. Ventana 16.

Ventana 17: Se verifica en el indicador de temperatura que esta sea la del objetivo del ensayo con un rango de variación de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Comenzar ensayo

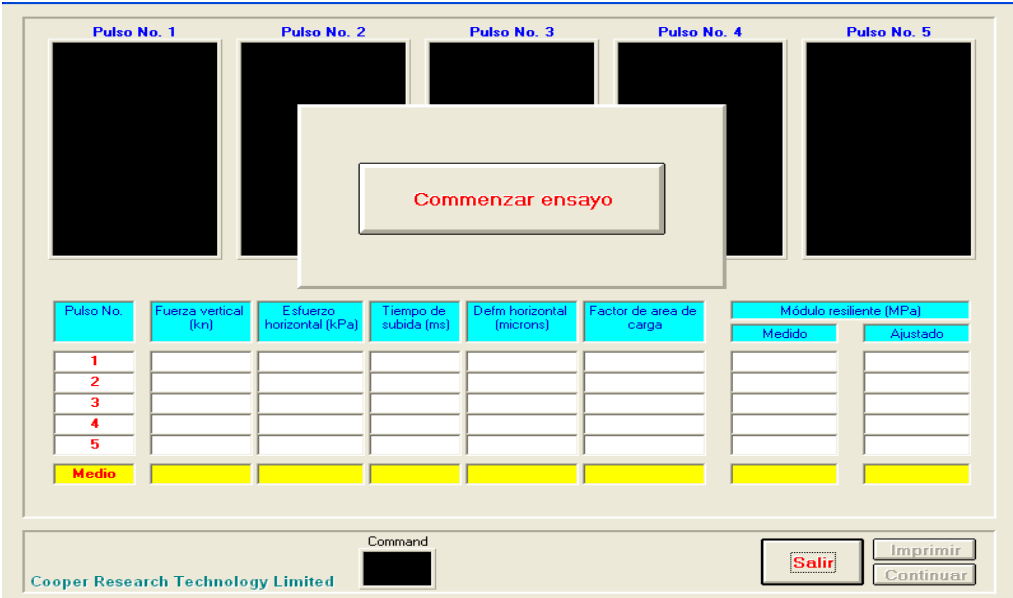


Figura 28. Ventana 17.

Ventana 18: Esta ventana muestra los resultados de fuerza vertical, esfuerzo horizontal, tiempo de subida, deformación horizontal, factor de área de carga y módulo dinámico o resiliente medido y ajustado. Continuar

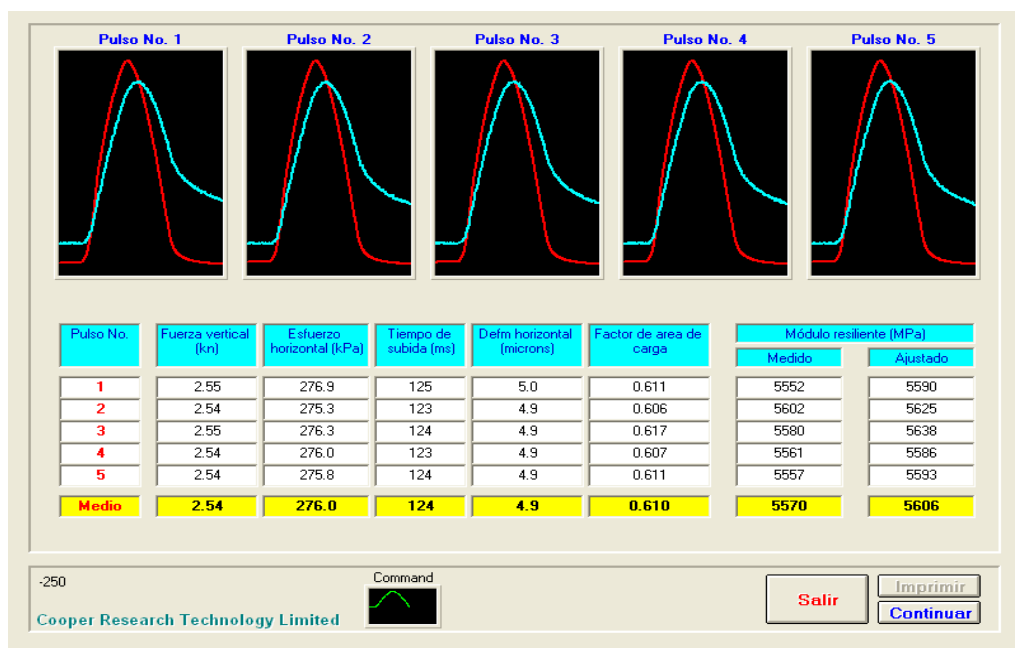


Figura 29. Ventana 18.

Ventana 19: Esta ventana nos indica que se debe girar la briqueta 90° para realizar el ensayo sobre el segundo diámetro, este proceso se lo realiza manualmente y pulsamos la tecla.

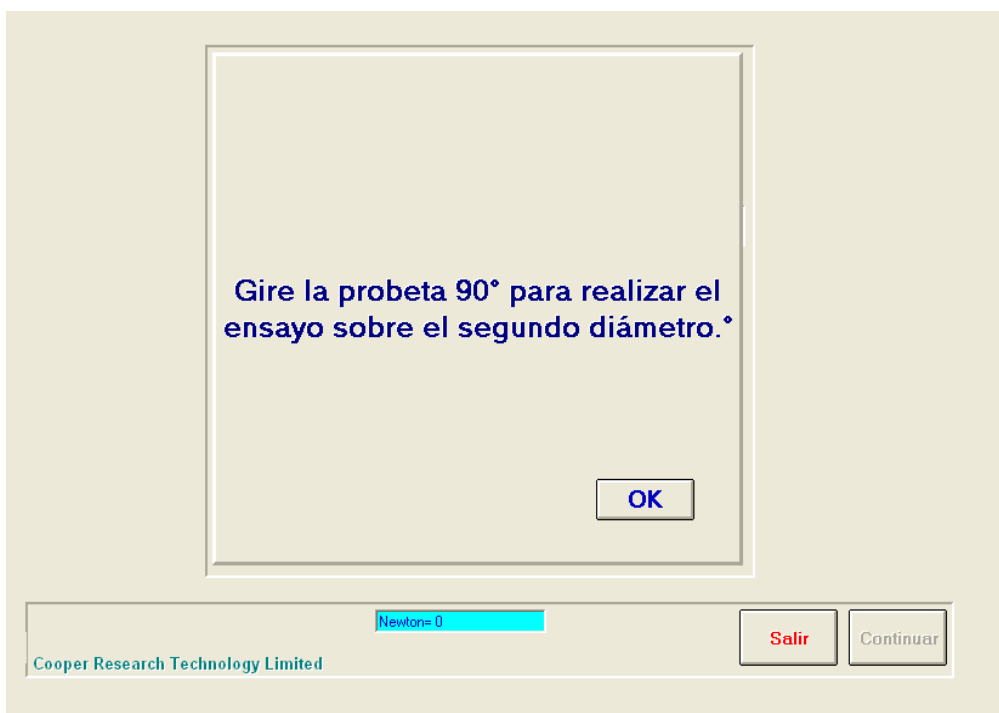


Figura 30. Ventana 19.

Para realizar el ensayo sobre el segundo diámetro se siguen los pasos del procedimiento desde la ventana 10.

5.5.2. DESCRIPCIÓN DEL FORMATO DE RESULTADOS.

Informe del módulo resiliente por compresión diametral

(EN 12697-26:2004(Annex C): (Equipo - CRT-HYD25)

No. De serie del informe de ensayo: 1

Fecha de impresión: 02:08:2012
 Ensayo realizado por: MANUEL MAILA
 Referencia de la probeta: B-10.PDF
 Temperatura de la probeta: 20°C
 Diámetro de la probeta: 102.8 mm
 Espesor de la probeta: 53 mm
 Densidad aparente: 2166 (kg/m³)
 Coeficiente de Poisson: 0.35
 Tiempo de subida deseado (ms): 124 ms
 Deformación horiz. Deseada (microns): 5 µm
 Número de pulsos de preparación: 10
 Frecuencia de lectura del transductor: 1000 Hz

Dirección del laboratorio de ensayo

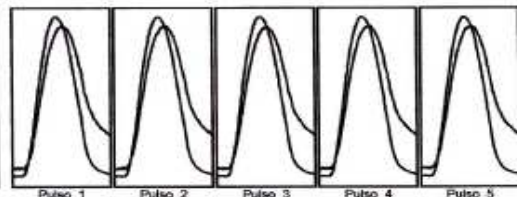
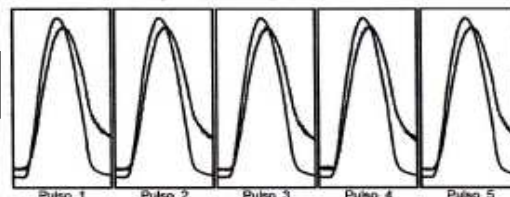
Cooper Research Technology Limited
 Athene House
 Heage Road Ind Est
 Ripley

Fecha y hora del ensayo : 02:Ago:2012 16:01 Nombre del cliente : Universidad Central

Tipo y origen de la mezcla bituminosa	elaborada en laboratorio
Método de fabricación de la mezcla bituminosa	mezcla con polímero eva
Método de compactación	automatico
Condiciones de almacenamiento	Temperatura 20°
Método de determinación de la densidad aparente	basico

Ensayo sobre el primer diámetro

Ensayo sobre el segundo diámetro



Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)	2.67	2.66	2.67	
Esfuerzo horizontal (kPa)	312.1	312.7	312.3	
Factor de área de carga	0.60	0.60	0.61	0.61
Deformación horizontal (µm)	5.0	4.9	5.0	5.0
Tiempo de carga (subida) (ms)	124	122.0	123.0	122.8
Módulo resiliente medido (MPa)		6211	6399	6273
Módulo resiliente ajustado (MPa)		6034	6436	6293

Resultados	Deseada	Real Min	Real Max	Media
Fuerza vertical (kN)	2.62	2.63	2.62	
Esfuerzo horizontal (kPa)	305.7	307.0	306.5	
Factor de área de carga	0.60	0.59	0.60	0.60
Deformación horizontal (µm)	5.0	4.9	5.1	5.0
Tiempo de carga (subida) (ms)	124	121.0	124.0	122.2
Módulo resiliente medido (MPa)		6016	6186	6091
Módulo resiliente ajustado (MPa)		5859	6183	6020

Media de los dos ensayos

Tiempo de carga (subida) (ms) :	122.4
Deformación horizontal (µm) :	5.0
Deformación horizontal (%) :	0.0049
Módulo resiliente medido (MPa) :	6182
Módulo resiliente ajustado (MPa) :	6187

Diferencia en porcentaje entre módulos resilientes ajustados medios = (3)

Responsable del ensayo	Firmado
Manuel Maila	
	Fecha de emisión del informe de ensayo
	02:08:2012

Donde:

1. Descripción física de la briqueta.
2. Identificación de la mezcla.
3. Gráficos de los pulsos de carga.
4. Descripción de resultados.
5. Resultados deseados.
6. Resultados reales mínimo y máximo.
7. Resultados Medios.
8. Resultados sobre el segundo diámetro.
9. Resultados medios de los dos ensayos y diferencia en porcentaje entre módulos.

Refiriéndose a los gráficos de los pulsos de carga que se muestran en el reporte de resultados estos representan las funciones de carga y deformación versus el tiempo donde mostrando por separado las dos cargas se tiene la siguiente figura.

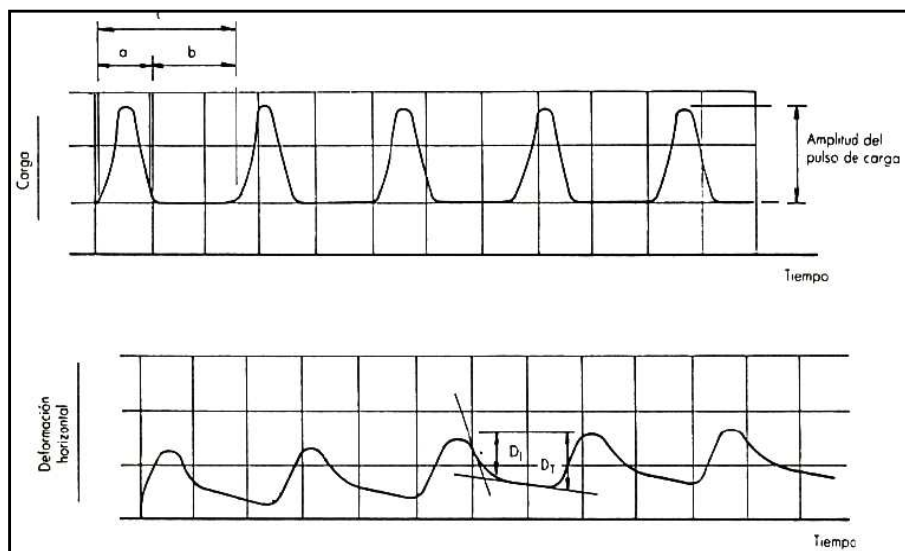


Figura 31. Funciones de Carga y Deformación Versus Tiempo.

Donde:

a = Duración del pulso de carga durante un ciclo de carga.

b = Tiempo de relajación.

c = Duración del ciclo.

DI = Deformación resiliente instantánea

DT = Deformación resiliente total.

Para el desarrollo de los cálculos, el software utiliza las siguientes ecuaciones de cálculo del Módulo Dinámico Medido y Ajustado respectivamente.

Ecuación N° 21. Módulo Dinámico Medido.

$$S_{me} = l * \frac{(v + 0,27)}{D * t} [MPa]$$

Donde:

S_{me} = Módulo Dinámico medido a un factor de carga y a la temperatura real de la muestra.

L = Valor máximo de la carga vertical aplicada en (N).

D = Amplitud de la deformación obtenida durante el ciclo de carga (mm).

t = Altura promedio de la muestra

v = Relación de Poisson`s.

Ecuación N° 22. Módulo Dinámico Ajustado.

$$S'_{me} = \frac{(1 - A * (0,60 - K)) * S_m}{(1 + B * (T1 - T))} [MPa]$$

Donde:

S'_{me} = Módulo Dinámico Ajustado a un factor de carga de 0,60 y a la temperatura objetivo del ensayo.

A = Factor de corrección para un factor de área de carga de 0,60.

B = Factor de corrección por temperatura.

K = Factor de área de carga.

T = Temperatura objetivo del ensayo (°C).

T1 = Temperatura real de la muestra (°C).

Ecuación N° 23. Factor de Corrección para un factor de área de carga de 0,60.

$$A = 0,322 * (\text{Log } 10Sme - 1,82)$$

Ecuación N° 24. Factor de corrección por temperatura.

$$B = -0,115 + 9 * 10^{-6} * Sme$$

Resultados:

Los resultados obtenidos para la mezcla convencional se muestran en la Tabla 12 y los resultados para la mezcla modificada en la Tabla 11, los cuales fueron promediados descartando los valores evidentemente erróneos, en el ANEXO 3 se puede observar el informe de cada uno de los ensayos realizado a cada una de las briquetas y el análisis de resultados se lo hará en el siguiente capítulo 6.

TABLA 11: RESULTADOS DEL MÓDULO DINÁMICO EN MEZCLA MODIFICADA PARA 10°C, 20°C Y 40°C.

	T °C	Nº B	PESO(gr)	d1 (cm)	d2 (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	d promed (mm)	h promed (mm)	v(m3)	densidad (kg/m3)	MÓDULO RESILENTE	PROMEDIO MÓDULO RESILENTE .(MPa)	MÓDULO RESILENTE AJ.(MPa)	PROMEDIO MÓDULO RESILENTE AJ.(MPa)
														(MPa)			
1% DE POLÍMERO	MOD.10°C	46	950,82	10,22	10,23	5,38	5,42	5,49	5,46	102,25	54,38	0,000446	2130	7459	6279,00	7518	6290,00
		47	955,17	10,2	10,21	5,38	5,42	5,45	5,41	102,05	54,15	0,000443	2157	6376		6393	
		48	948,27	10,22	10,23	5,42	5,36	5,38	5,45	102,25	54,03	0,000444	2138	6182		6187	
	MOD.20°C	52	954,3	10,29	10,26	5,3	5,34	5,41	5,34	102,75	53,48	0,000443	2152	3413	3555,33	3426	3569,67
		53	945,86	10,26	10,31	5,23	5,31	5,29	5,21	102,85	52,60	0,000437	2164	3695		3721	
		54	952,45	10,26	10,31	5,24	5,33	5,35	5,27	102,85	52,98	0,000440	2164	3558		3562	
	MOD.40°C	58	950,82	10,22	10,23	5,38	5,42	5,49	5,46	102,25	54,38	0,000446	2130	705	732,50	700	728,00
		59	945,86	10,26	10,31	5,23	5,31	5,29	5,21	102,85	52,60	0,000437	2164	760		756	
		60	932,97	10,31	10,29	5,4	5,37	5,27	5,32	103,00	53,40	0,000445	2097	1126		1122	
2% DE POLÍMERO	MOD.10°C	49	944,22	10,3	10,34	5,19	5,22	5,39	5,34	103,20	52,85	0,000442	2136	7162	6670,50	7186	6695,00
		50	954,82	10,18	10,21	5,34	5,24	5,23	5,33	101,95	52,85	0,000431	2213	5305		5288	
		51	937,65	10,22	10,21	5,31	5,41	5,41	5,33	102,15	53,65	0,000440	2133	6179		6204	
	MOD.20°C	55	949,07	10,35	10,35	5,19	5,26	5,19	5,1	103,50	51,85	0,000436	2176	4330	4163,00	4348	4178,00
		56	951,93	10,33	10,32	5,31	5,38	5,33	5,28	103,25	53,25	0,000446	2135	3996		4008	
		57	951,12	10,3	10,32	5,37	5,34	5,44	5,44	103,10	53,98	0,000451	2111	4708		4705	
	MOD.40°C	61	949,07	10,35	10,35	5,19	5,26	5,19	5,1	103,50	51,85	0,000436	2176	923	914,00	924	914,00
		62	954,82	10,18	10,21	5,34	5,24	5,23	5,33	101,95	52,85	0,000431	2213	905		904	
		63	948,29	10,18	10,17	5,44	5,53	5,53	5,46	101,75	54,90	0,000446	2124	1112		1107	

	T °C	Nº B	PESO(gr)	d1 (cm)	d2 (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	d promed (mm)	h promed (mm)	v(m3)	densidad (kg/m3)	MÓDULO RESILENTE (MPa)	PROMEDIO MÓDULO RESILENTE (MPa)	MÓDULO RESILENTE AJ.(MPa)	PROMEDIO MÓDULO RESILENTE AJ.(MPa)
3% DE POLÍMERO	MOD.10°C	7	952,45	10,26	10,31	5,24	5,33	5,35	5,27	102,85	52,98	0,000440	2164	9116	9489,00	9172	9531,50
		8	956,67	10,18	10,19	5,35	5,38	5,46	5,43	101,85	54,05	0,000440	2172	7095		7155	
		9	956,46	10,27	10,27	5,37	5,42	5,3	5,29	102,70	53,45	0,000443	2160	9862		9891	
	MOD.20°C	10	951,79	10,27	10,28	5,31	5,35	5,3	5,24	102,75	53,00	0,000439	2166	6182	5553,50	6187	5770,00
		11	952,74	10,27	10,28	5,32	5,36	5,3	5,24	102,75	53,05	0,000440	2166	5590		5588	
		12	949,87	10,2	10,22	5,39	5,34	5,24	5,31	102,10	53,20	0,000436	2181	5517		5535	
	MOD.40°C	13	939,22	10,26	10,3	5,38	5,34	5,21	5,24	102,80	52,93	0,000439	2138	1510	1339,00	496	1338,00
		14	954,52	10,2	10,25	5,56	5,55	5,45	5,49	102,25	55,13	0,000453	2109	1339		1338	
		15	932,97	10,31	10,29	5,4	5,37	5,27	5,32	103,00	53,40	0,000445	2097	1133		1129	
4% DE POLÍMERO	MOD.10°C	22	953,37	10,28	10,26	5,38	5,42	5,34	5,31	102,70	53,63	0,000444	2146	8496	8368,00	8557	8389,50
		23	937,65	10,22	10,21	5,31	5,41	5,41	5,33	102,15	53,65	0,000440	2133	6645		6620	
		24	952,77	10,2	10,2	5,49	5,41	5,39	5,47	102,00	54,40	0,000445	2143	8240		8222	
	MOD.20°C	25	950,18	10,31	10,33	5,37	5,43	5,36	5,3	103,20	53,65	0,000449	2117	4708	4472,50	4705	4474,00
		26	951,93	10,33	10,32	5,31	5,38	5,33	5,28	103,25	53,25	0,000446	2135	4237		4243	
		27	944,22	10,3	10,34	5,19	5,22	5,39	5,34	103,20	52,85	0,000442	2136	3823		3826	
	MOD.40°C	28	950,76	10,22	10,23	5,45	5,43	5,54	5,54	102,25	54,90	0,000451	2109	1309	1292,00	1308	1291,00
		29	954,3	10,29	10,26	5,3	5,34	5,41	5,34	102,75	53,48	0,000443	2152	1446		1443	
		30	942,76	10,19	10,19	5,35	5,42	5,43	5,36	101,90	53,90	0,000440	2145	1275		1274	
5% DE POLÍMERO	MOD.10°C	37	954,99	10,28	10,31	5,45	5,39	5,32	5,38	102,95	53,85	0,000448	2130	7544	6846,50	7546	6850,00
		38	942,14	10,35	10,35	5,35	5,24	5,23	5,28	103,50	52,75	0,000444	2123	6967		6983	
		39	950,88	10,21	10,22	5,41	5,47	5,53	5,49	102,15	54,75	0,000449	2119	6726		6717	
	MOD.20°C	40	948,29	10,18	10,17	5,44	5,53	5,53	5,46	101,75	54,90	0,000446	2124	3558	3478,00	3562	3486,67
		41	948,27	10,22	10,23	5,42	5,36	5,38	5,45	102,25	54,03	0,000444	2138	3438		3449	
		42	948,09	10,32	10,3	5,25	5,24	5,34	5,34	103,10	52,93	0,000442	2146	3692		3700	
	MOD.40°C	43	955,17	10,2	10,21	5,38	5,42	5,45	5,41	102,05	54,15	0,000443	2157	1111	1118,50	1106	1114,00
		44	952,87	10,29	10,3	5,51	5,46	5,37	5,48	102,95	54,55	0,000454	2098	1126		1122	
		45	951,12	10,3	10,32	5,37	5,34	5,44	5,44	103,10	53,98	0,000451	2111	1385		1380	

TABLA 12: RESULTADOS DEL MÓDULO DINÁMICO EN MEZCLA CONVENCIONAL PARA 10°C, 20°C Y 40°C.

	T °C	Nº B	PESO(gr)	d1 (cm)	d2 (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	d promed (mm)	h promed (mm)	v(m3)	densidad (kg/m3)	MÓDULO RESILENTE (MPa)	PROMEDIO MÓDULO RESILENTE .(MPa)	MÓDULO RESILENTE AJ.(MPa)	PROMEDIO MÓDULO RESILENTE AJ.(MPa)
0 % DE POLÍMERO	MOD.10°C	D	950,85	10,19	10,21	5,45	5,55	5,44	5,43	102,00	54,68	0,000447	2128	5563	5479,33	5598	5494,67
		E	948,58	10,3	10,29	5,4	5,35	5,25	5,31	102,95	53,28	0,000443	2139	5320		5326	
		F	957,09	10,19	10,2	5,29	5,32	5,39	5,41	101,95	53,53	0,000437	2190	5555		5560	
	MOD.20°C	A	947,3	10,23	10,21	5,29	5,29	5,22	5,21	102,20	52,53	0,000431	2199	2763	2612,67	2769	2614,33
		B	954,76	10,24	10,29	5,36	5,3	5,27	5,34	102,65	53,18	0,000440	2170	2543		2544	
		C	947,14	10,29	10,28	5,23	5,26	5,36	5,35	102,85	53,00	0,000440	2151	2532		2530	
	MOD.40°C	M	935,55	10,22	10,24	5,69	5,73	5,62	5,58	102,30	56,55	0,000465	2013	401	519,50	399	518,00
		N	952,11	10,3	10,3	5,39	5,27	5,26	5,38	103,00	53,25	0,000444	2146	552		550	
		O	946,5	10,25	10,22	5,3	5,34	5,29	5,21	102,35	52,85	0,000435	2177	487		486	

5.6. ENSAYO DE TENSIÓN INDIRECTA (ASTM D-4123).

La prueba de ruptura por tensión es llevada a cabo sobre una briqueta estándar ensayada sobre su costado en compresión diametral. Una carga es aplicada a la briqueta con un índice de 690 a 1380 KPa/min hasta que esta falle. El elemento de concreto asfáltico sobre el diámetro vertical está sujeto a esfuerzos de compresión vertical y de tensión horizontal. El esfuerzo de tensión horizontal para que ocurra la falla, el cual es la resistencia a la tensión, se calcula con la ecuación N° 28.

Ecuación N° 28. Resistencia a la Tensión.

Donde:

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD}$$

f_t = Resistencia a la tensión, Kg/cm².

P = Carga aplicada a compresión, Kg.

L = Longitud de la briqueta, cm.

D = Diámetro del cilindro, cm.

Equipo

- Maquina de ensayo.
- Baño de agua.
- Franja de carga con superficie cóncava.
- Termómetro.
- Briquetas.

Procedimiento.

Antes de trabajar este ensayo se fabricaron 15 briquetas con mezcla modificada ,3 por cada porcentaje de polímero y 3 con mezcla convencional para su posterior análisis comparativo.

Para determinar la altura promedio de cada briqueta se debe seguir el procedimiento indicado para el ensayo dinámico.

Colocar las briquetas de ensayo en baño maría a una temperatura controlada de 60 °C , las briquetas deberán permanecer en baño maría a la temperatura especificada de ensayo, por lo menos durante 24 horas antes del ensayo.

Colocar una briqueta dentro del aparato de carga en posición para que las franjas de carga sean paralelas y queden centradas con respecto al plano diametral vertical (ver Fotografía 49).



Fotografía 49: Montaje de Equipo para el ensayo de Tensión Indirecta.

Aplicar una carga a compresión hasta que la briqueta falle (ver Fotografía 50).



Fotografía 50: Aplicando carga hasta que falle la briqueta.

Con los datos obtenidos de cada briqueta se procede a los respectivos cálculos para obtener la tensión indirecta por compresión.

Resultados:

Los resultados obtenidos en este ensayo tanto para la mezcla convencional como la modificada se encuentran en la Tabla 13, los cuales fueron promediados descartando los valores evidentemente erróneos y el análisis de resultados se lo hará en el siguiente capítulo 6.

TABLA 13 :RESULTADOS DEL ENSAYO DE TENSIÓN INDIRECTA EN LA MEZCLA MODIFICADA														
%POLÍMERO EVA	Nº B	PESO(gr)	d1 (cm)	d2 (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	D promed (cm)	H promed (cm)	Lectura		TENSIÓN INDIRECTA $\frac{2P}{\pi DH}$ (Kg/cm²)	PROMEDIO
											Dial	MEDIDO P (Kg)		
1% Polímero EVA	64	952,36	10,2	10,19	5,53	5,49	5,45	5,48	10,20	5,49	190	642	7,31	7,55
	65	945,86	10,26	10,31	5,23	5,31	5,29	5,21	10,29	5,26	196	662	7,79	
	66	954,88	10,25	10,3	5,39	5,41	5,31	5,28	10,28	5,35	250	842	9,76	
2% Polímero EVA	73	950,42	10,23	10,32	5,4	5,41	5,35	5,32	10,28	5,37	220	742	8,56	8,56
	74	954,82	10,18	10,21	5,34	5,24	5,23	5,33	10,20	5,29	219	739	8,73	
	75	938,75	10,27	10,25	5,37	5,32	5,37	5,42	10,26	5,37	215	725	8,38	
3% Polímero EVA	4	958,12	10,31	10,27	5,31	5,34	5,39	5,37	10,29	5,35	279	938	10,84	10,95
	5	942,43	10,22	10,21	5,39	5,44	5,39	5,34	10,22	5,39	311	1046	12,09	
	6	914,74	10,2	10,17	5,27	5,34	5,37	5,3	10,19	5,32	280	942	11,07	
4% Polímero EVA	19	953,29	10,23	10,22	5,4	5,45	5,38	5,34	10,23	5,39	267	899	10,38	10,08
	20	944,04	10,35	10,35	5,42	5,39	5,3	5,31	10,35	5,36	253	852	9,79	
	21	950,53	10,2	10,18	5,48	5,49	5,42	5,4	10,19	5,45	287	966	11,08	
5% Polímero EVA	34	953,39	10,21	10,19	5,45	5,43	5,35	5,36	10,20	5,40	232	782	9,04	8,96
	35	957,21	10,23	10,23	5,32	5,35	5,32	5,36	10,23	5,34	226	762	8,88	
	36	948,61	10,27	10,29	5,22	5,32	5,29	5,22	10,28	5,26	218	735	8,65	
RESULTADOS DEL ENSAYO DE TENSIÓN INDIRECTA PARA MEZCLA CONVENCIONAL														
Sin Polímero	81	953,15	10,30	10,28	5,51	5,58	5,66	5,55	10,29	5,58	185	625	6,94	6,72
	81	947,12	10,27	10,27	5,66	5,66	5,75	5,76	10,27	5,71	177	599	6,51	
	81	945,09	10,32	10,25	5,44	5,36	5,32	5,40	10,29	5,38	205	692	7,96	

CAPITULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Con la finalidad de evaluar los resultados obtenidos en los ensayos para determinar las propiedades físico - mecánicas de las mezclas asfálticas convencional y modificada se realiza un análisis comparativo de resultados el mismo que es importante para determinar las mejoras de la mezcla modificada con respecto a la mezcla convencional.

Para el efecto de análisis se realizaron tablas y gráficos que muestran la diferencia de resultados entre las dos mezclas. Se estableció que la mezcla convencional como modificada superan ampliamente los requerimientos mínimos especificados por las normas que rigen a cada ensayo.

Con la finalidad de disponer de la información suficiente para que el análisis de resultados sea confiable se fabricaron 38 briquetas Marshall con mezcla convencional y 90 briquetas Marshall con mezcla modificada, las mismas que fueron utilizadas en cada uno de los ensayos como se describe en el capítulo 5.

6.1 RESULTADOS ENSAYO MARSHALL.

Los resultados del ensayo Marshall se los representó en gráficos, para poder entender las características particulares de cada una de las briquetas usadas en la serie. Mediante el estudio de los gráficos se puede determinar cual briketa cumple mejor los criterios establecidos para el pavimento terminado. Las proporciones de asfalto y agregado en esta briketa se convierten en las proporciones usadas en la mezcla final.

El gráfico N°2 y la Tabla 8 muestran los resultados obtenidos en el ensayo Marshall. Donde se encuentran representados mediante puntos los resultados de las siguientes pruebas. Los valores de estos análisis se representan en el gráfico en el siguiente orden: 1 Densidad; 2 Porcentajes de vacíos de aire; 3 Porcentajes de vacíos en el agregado mineral (V.A.M); 4 Porcentajes de vacíos llenos de asfalto (V.F.A); 5 Estabilidad y 6 Fluencia. Los puntos que representan los diferentes valores son conectados mediante líneas para formar curvas suaves.

Con los resultados de los ensayos graficados se pueden observar ciertas tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla. A continuación se enuncian ciertas tendencias que pueden observarse al estudiar el gráfico N°2.

- En la curva de la densidad de la mezcla se observa que esta aumenta hasta un cierto porcentaje de asfalto, luego tiende a disminuir.
- El porcentaje de vacíos de aire disminuye a medida que aumenta el porcentaje de asfalto.

- El porcentaje de vacíos en el agregado mineral (V.A.M) disminuye hasta un valor mínimo, luego aumenta con incrementos en el contenido de asfalto.
- El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (V.F.A) aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de asfalto.
- Los valores de estabilidad Marshall aumentan hasta un determinado valor de contenido de asfalto y luego disminuyen cuando el porcentaje de asfalto es mayor.
- Los valores de fluencia aumentan con incrementos de contenido de asfalto.

Para este estudio, el contenido óptimo de asfalto en el diseño de la mezcla final se determinó a partir de los resultados descritos anteriormente y en cada caso (excepto en la curva del flujo) el porcentaje óptimo de asfalto. Así para la primera curva, el porcentaje óptimo será aquel que de la máxima densidad (6,35% de asfalto); para la segunda curva, el porcentaje óptimo será aquel que dé un % mínimo de vacíos (6,55% de asfalto) ;para la tercera curva , el porcentaje óptimo es aquel que da un % mínimo de vacíos de agregado mineral (5,80% de asfalto) ; en la cuarta curva, el porcentaje óptimo de asfalto será el que de un % máximo de vacíos llenos de asfalto (6,80% de asfalto), y mientras que en la quinta curva, el porcentaje óptimo de asfalto es aquel que da una estabilidad máxima (6,05% de asfalto) .

Una vez obtenidos los cinco porcentajes óptimos de asfalto, se estableció un valor promedio, el mismo que corresponde al porcentaje óptimo de asfalto en el diseño (6,30% de asfalto).

Del gráfico N°2 se determinó que para un contenido de asfalto de 6.30 por ciento los valores de las propiedades son las siguientes:

Densidad de la probeta = 2,241 Kg/dm³.

Vacios de aire = 4,0%

Porcentaje de vacíos del agregado mineral (V.A.M) = 15,0%

Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (V.F.A) = 74%.

Estabilidad = 1970 Kg.

Fluencia = 12.0 (0.01plg).

Estos valores se compararon con los valores recomendados por el Instituto del Asfalto (USA) en los criterios de diseño Marshall Tabla 14, para una mezcla superficial con tránsito pesado. El valor de

estabilidad 1970Kg, excede el criterio mínimo de 818.18 Kg. El valor de flujo 12 (0.01plg) cae dentro del margen establecido por los criterios el cual es de 8 a 14. El porcentaje de vacíos llenos de asfalto (V.F.A) 74% cae dentro del margen establecido por los criterios el cual es de 65 a 75. El porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral (V.M.A) es revisado utilizando la Tabla 15 donde usando la graduación del agregado de $\frac{3}{4}$ de pulgada se observa que el valor de V.M.A de 15% sobrepasa el mínimo requerido de 13%.

Criterios para Mezcla del Método Marshall	Transito Liviano Carpeta y Base		Transito Mediano Carpeta y Base		Transito Pesado Carpeta y Base		RESULTADO
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Compactación, número de golpes en cada cara de la probeta	35		50		75		75
Estabilidad N Kg	3336	---	5338	--	8006	--	19306
	340.91	---	545.45	---	818.18	---	1970
Flujo, 0,25mm(0.01plg)	8	18	8	16	8	14	12
Porcentaje de Vacíos	3	5	3	5	3	5	4
Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)	Según Tabla 18 para granulometría de $\frac{3}{4}$ " el V.M.A mínimo 13%						15
Porcentaje de Vacíos llenos de Asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75	74

Tabla 14. Análisis de Resultados de Diseño Marshall según Criterios del Instituto del Asfalto (USA).

Tamaño Máximo en mm		VMA mínimo, por ciento		
Porcentaje		Vacíos de Diseño, por ciento		
Mm	Plg	3	4	5
1.18	Nº.16	21.5	22.5	23.5
2.36	Nº.8	19	20	21
4.75	Nº.4	16	17	18
9.5	3/8	14	15	16
12.5	1/2	13	14	15
19	3/4	12	13	14
25	1	11	12	13
37.5	5	10	11	12
50	2	9.5	10.5	11.5
63	2.5	9	10	11

Tabla 15. Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral.

Así, la mezcla convencional quedó definida por 40 por ciento de agregado fino de Mulaló, 60 por ciento de agregado Grueso de Cashapamba y 6,30 por ciento de asfalto.

Con el criterio de que el polímero EVA se incorpora a la mezcla como modificante del asfalto, se decidió fabricar briquetas para someterlas a ensayo Marshall, con la finalidad de obtener un parámetro más de comparación como la estabilidad y el flujo. Para efectos de este ensayo se fabricaron 3 briquetas con mezcla convencional y 15 con mezcla modificada, los resultados se pueden ver en la tabla 16, los cuales fueron promediados descartando los valores evidentemente erróneos.

RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL EN MEZCLA MODIFICADA CON POLÍMERO EVA											
b	P E S O (gramos)					Densidad	Estabilidad (Kg.)				
% polímero EVA		Seca Aire	S.S.S. Aire	En Agua	Volúmen	"Bulk"	Dial	Medida	Factor de Corrección	Corregida	Flujo
	B	d	e	f	v	g	o	q	r	s	t
	No.				e -f	d/v					1/100"
1,0	76	953	956	522	434	2,196	458	1536	1,32	2028	10
	77	957	959	522	437	2,190	463	1552	1,32	2049	12
	78	952	955	524	431	2,209	450	1509	1,39	2098	7
	PROMEDIO									2038	11
2,0	79	953	956	523	433	2,201	470	1576	1,32	2080	11
	80	950	952	522	430	2,209	525	1759	1,39	2445	14
	81	940	943	517	426	2,207	451	1512	1,39	2102	11
	PROMEDIO									2091	11
3,0	82	955	960	516	444	2,151	475	1592	1,32	2101	11
	83	934	938	505	433	2,157	449	1506	1,32	1988	8
	84	954	959	522	437	2,183	480	1609	1,32	2124	12
	PROMEDIO									2113	12
4,0	85	938	944	513	431	2,176	442	1482	1,39	2060	11
	86	953	956	521	435	2,191	467	1566	1,32	2067	13
	87	951	955	519	436	2,181	470	1576	1,32	2080	13
	PROMEDIO									2069	12
5,0	88	952	956	525	431	2,209	436	1462	1,39	2032	12
	89	951	957	517	440	2,161	458	1536	1,32	2028	13
	90	956	961	523	438	2,183	432	1449	1,32	1913	10
	PROMEDIO					2,184				2030	13
RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL EN MEZCLA CONVENCIONAL											
0,0	Q	954	955	523	432	2,208	450	1509	1,32	1992	12
	R	955	957	528	429	2,226	431	1446	1,39	2010	10
	S	956	959	522	437	2,188	498	1669	1,32	2203	13
	PROMEDIO					2,207				2001	11

Tabla 16. Resultados de Estabilidad y Flujo del ensayo Marshall.

Con estos resultados del ensayo Marshall tanto para la mezcla modificada como la convencional se procedió a realizar los gráficos 3 y 4, con la finalidad de realizar un análisis comparativo de resultados de la estabilidad y el flujo, los mismos que son importantes para determinar las mejoras de la mezcla modificada con respecto a la mezcla convencional.

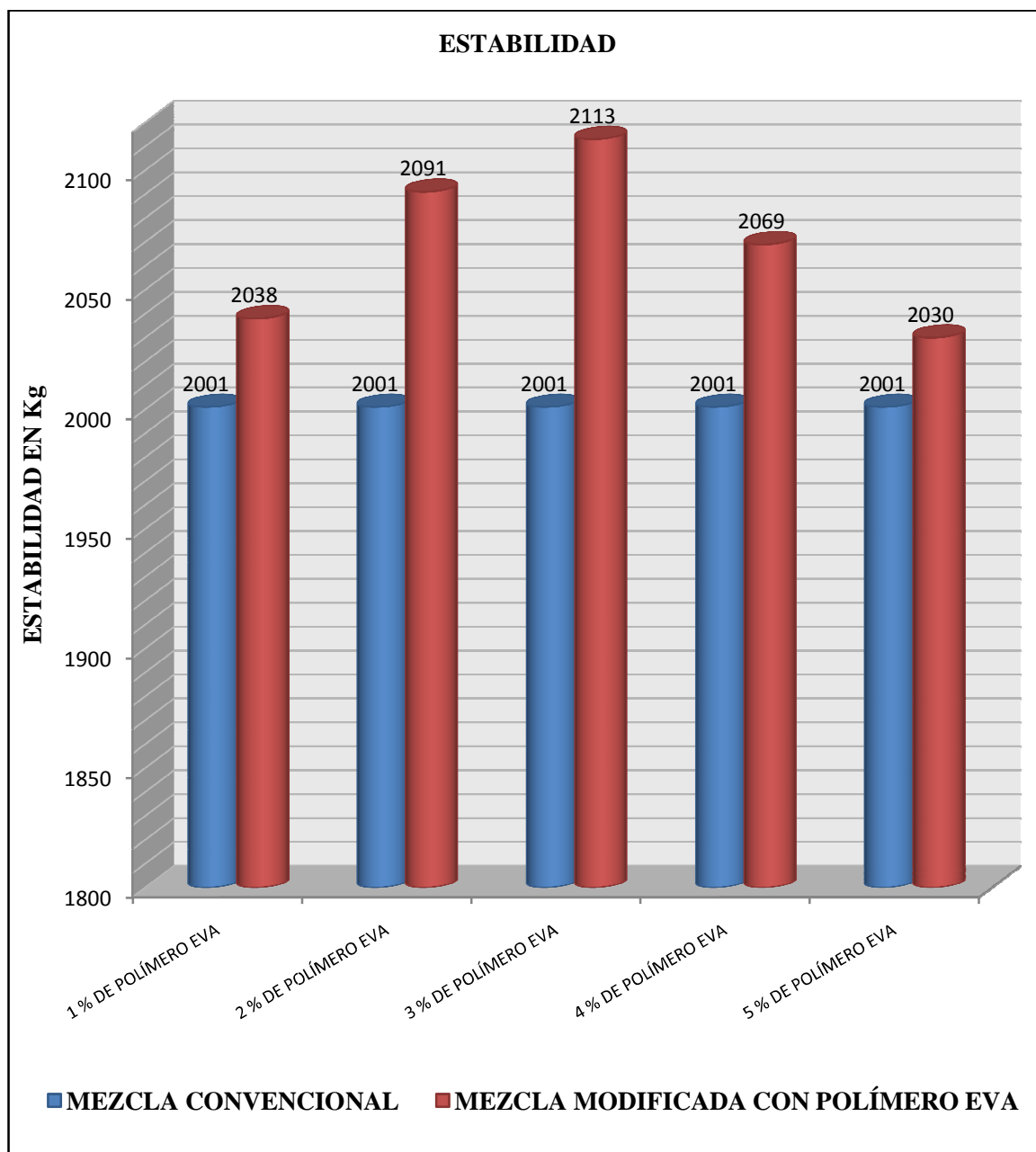


Gráfico N° 3: Comparación de resultados de la estabilidad entre las mezclas modificadas y la convencional.

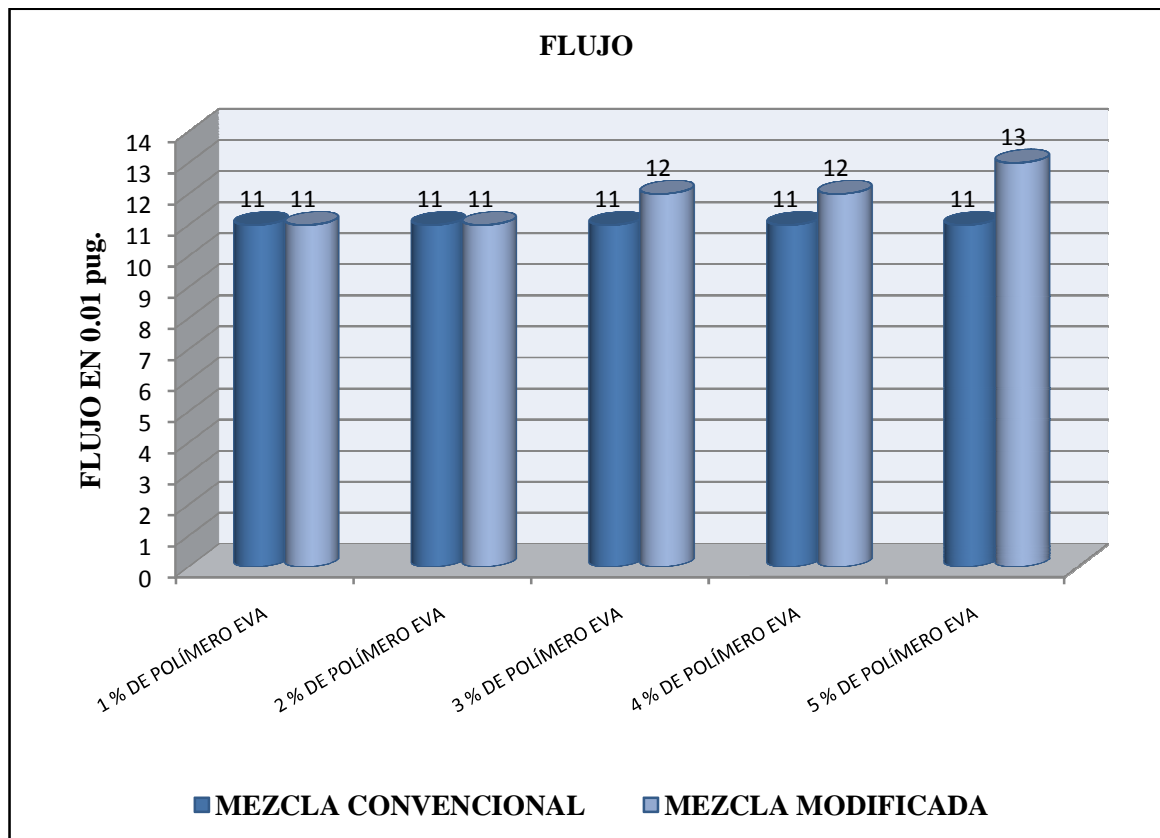


Gráfico N° 4: Comparación de resultados del flujo entre las mezclas modificadas y la convencional.

En el Gráfico N° 3. Se puede notar que la estabilidad de las mezclas modificadas con un contenido de polímero del 2% y 3% son las que dan mejores resultados. Del gráfico N° 4. Analizando el flujo para estas dosificaciones de mezclas se tiene que están dentro del rango permisible que es de 8 a 14.

Como se puede ver en los Gráficos N° 3 y 4. Para la mezcla convencional se observa que la estabilidad tiene un valor elevado y un flujo que está dentro del rango permisible y teniendo presente que este tipo de mezclas a mayor estabilidad se vuelven frágiles lo que ocasiona fallas por agrietamiento, la mezcla investigada supera la estabilidad de la mezcla convencional, pero se comprobó que esta no será tan frágil por el contenido de polímero el mismo que le proporciona un módulo dinámico de elasticidad elevado en comparación a la mezcla convencional como se podrá observar en el análisis de resultados de módulo dinámico.

6.2 RESULTADOS ENSAYO CÁNTABRO O DE PÉRDIDA POR DESGASTE.

Con los resultados mostrados en la tabla 10 del capítulo 5 se realizó el gráfico N° 5. Donde se presentan las pérdidas por desgaste, obtenidas para los diferentes porcentajes de dosificación de polímero EVA, con la finalidad de comparar gráficamente la diferencia de resultados obtenidos entre estas., y tomando en cuenta que la norma especifica que el porcentaje de desgaste máximo es del 25%.

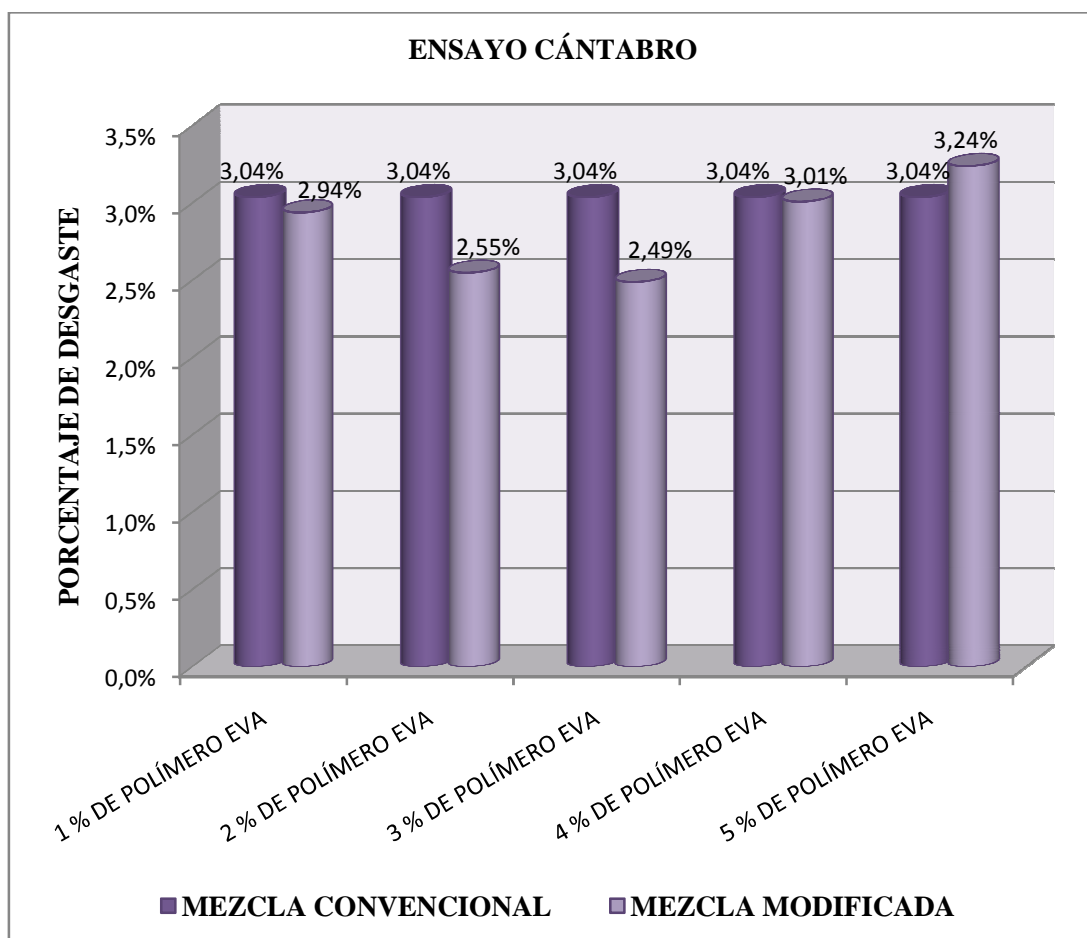


Gráfico N° 5.Comparación de resultados del ensayo cántabro entre las mezclas modificadas y la convencional.

Se puede observar en el Gráfico N° 5 que el porcentaje de desgaste disminuye al aumentar el porcentaje de polímero hasta un determinado valor ,luego aumenta el porcentaje de desgaste a medida

que sigue incrementándose el porcentaje de polímero, sin embargo todas las adiciones de polímero realizadas se encuentran bajo el límite máximo de desgaste permisible que es el 25%.

También se puede observar que se obtiene menor desgaste en las briquetas que se fabricaron con el 3% de polímero, llegando a tener un porcentaje de desgaste menor al de la mezcla convencional, lo que hasta este momento nos indica que el porcentaje óptimo es el 3 % de polímero, sería la mejor opción.

Para asegurar que el porcentaje óptimo de polímero sea el correcto, se realizó los ensayos de módulo dinámico y tensión indirecta, los mismos que coincidieron como mejor resultado el 3% de adición de polímero en la mezcla asfáltica, como se podrá observar más adelante en los posteriores análisis.

6.3 RESULTADOS MÓDULO DINÁMICO ELÁSTICO O RESILIENTE.

Este ensayo se realiza sobre los dos diámetros perpendiculares. El valor medido en el segundo diámetro, generalmente es más bajo. Si el valor calculado para el segundo diámetro está dentro de un rango de -20% a $+10\%$ del valor calculado para el primer diámetro, se toma el promedio de los dos como el módulo dinámico de la muestra. Si la diferencia está por fuera de este rango, los resultados se rechazan⁹.

En el presente estudio esta diferencia se encuentra dentro del rango establecido para todos los ensayos realizados, lo cual se puede verificar revisando el anexo 3. Con los resultados mostrados en la Tabla 11 y 12 del capítulo 5 se realizó el gráfico N° 6.

⁹ Dávila M, Juan Manuel. Análisis Comparativo de Módulo Resiliente y Ensayos de Deformación Permanente en Mezclas Asfálticas del tipo (MDC2) en Briquetas compactadas con Martillo Marshall y Compactador Giratorio. Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería. Bogotá D.C. Pag. 66

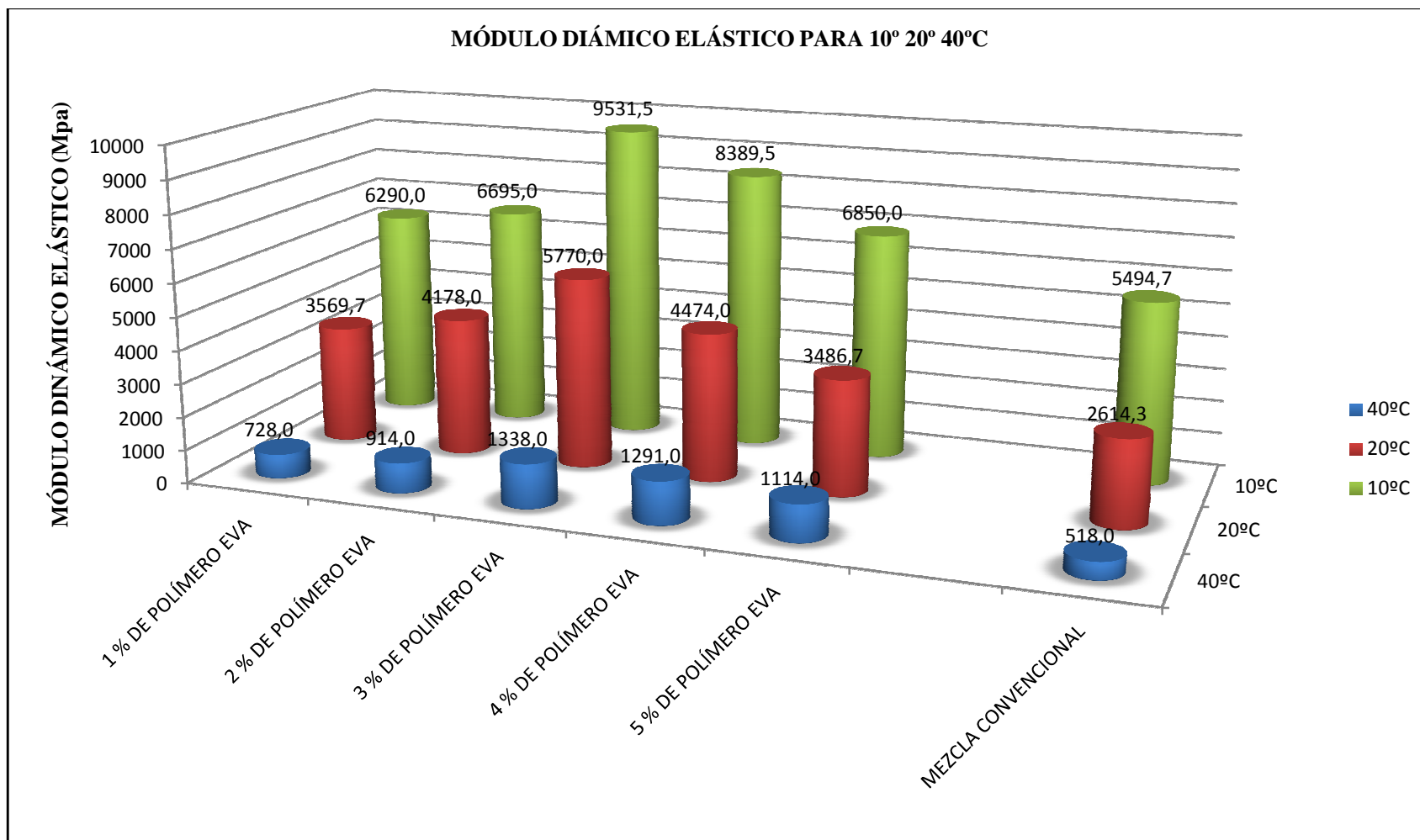


Gráfico N° 6: Comparación de resultados del ensayo de Módulo dinámico entre las mezclas modificadas y la convencional.

En el gráfico N°6. Se observa que el módulo dinámico varía en función de los siguientes factores:

- Temperatura: la relación entre temperatura y módulo dinámico es inversamente proporcional, es así como se tiene que a mayor grado de temperatura se obtiene módulos dinámicos pequeños y a menor temperatura módulos dinámicos elevados.
- Porcentaje de adición del polímero EVA: en el presente estudio se obtuvo mejores resultados para la dosificación del 3%, lo que hasta ahora nos indica que esta es la dosificación óptima de polímero para la mezcla de investigación.

Finalmente observando los resultados obtenidos en la mezcla de investigación se puede notar que el módulo dinámico elástico se incrementó hasta en un 40% con relación a las mezclas convencionales.

6.4 RESULTADOS TENSIÓN INDIRECTA.

Con los resultados mostrados en la tabla 13 del capítulo 5 se realizó el gráfico N° 7, donde se presentan la tensión indirecta.

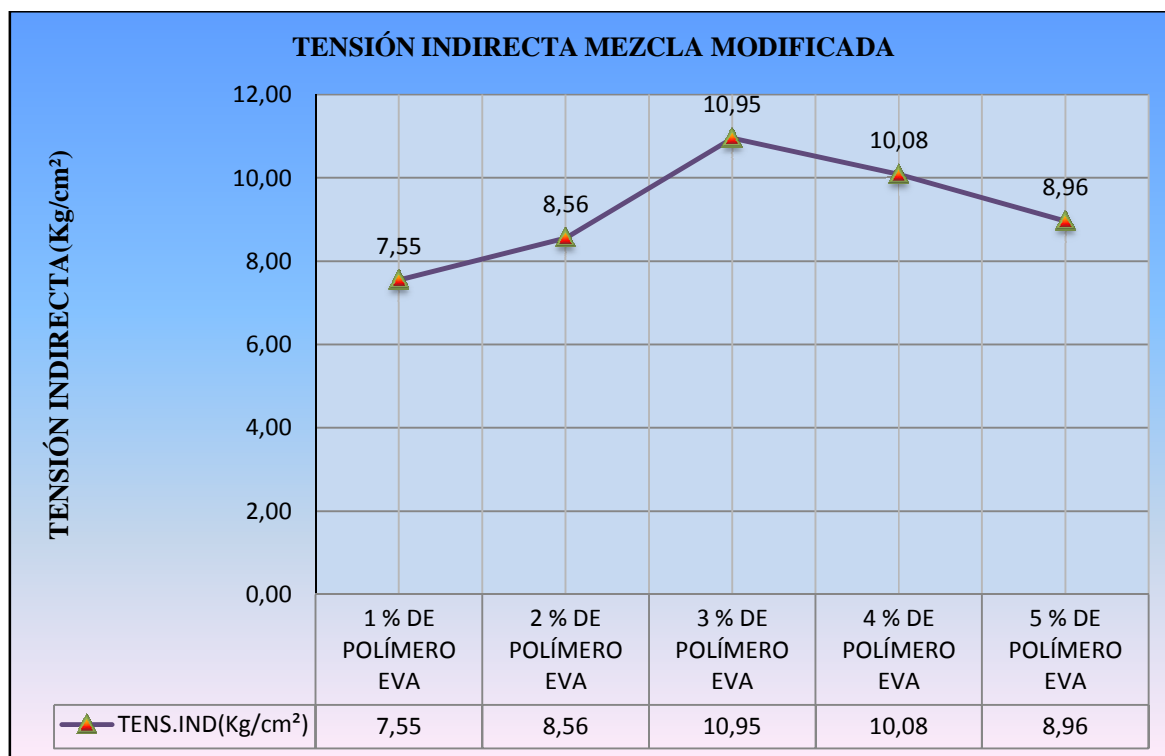


Gráfico N° 7.Comparación de resultados del ensayo de Tensión Indirecta entre las mezclas modificadas y la convencional.

En el gráfico N°7 se observa que el valor de la tensión indirecta asciende hasta un valor máximo de 10.95 Kg/cm², el mismo que corresponde a una dosificación de 3% de polímero, a partir de este valor la curva empieza a descender a medida que se sigue incrementando el porcentaje de polímero.

Luego de realizar el análisis de resultados de los ensayos Marshall, Cántabro, Módulo Dinámico y Tensión Indirecta se obtuvo que la dosificación más idónea es la que corresponde a la adición del 3% de polímero y la dosificación óptima para la mezcla modificada es 40 por ciento de agregado fino de Mulaló, 60 por ciento de agregado grueso de Cashapamba, 6,3 por ciento de asfalto y 3 por ciento de polímero EVA (en peso de asfalto). La mejora en los resultados finales se muestra en la Tabla 17.

RESUMEN DE RESULTADOS			DIFERENCIA
ENSAYOS	MEZCLA		%
	CONVENCIONAL	MODIFICADA	
MARSHALL			
ESTABILIDAD (Kg).	2001,00	2113,00	5,30
FLUJO (0.01Plg.)	11	12	8,33
CÁNTABRO (%) .	3,04	2,49	22,08
MÓDULO DINÁMICO (Mpa) .			
10°C	5495,67	9531,50	42,35
20°C	2614,33	5770,00	45,31
40°C	518,00	1338,00	38,71
TENSIÓN INDIRECTA (Kg/cm2) .	6,72	10,95	38,63

Tabla 17. Resumen de Resultados.

CAPITULO 7: ANALISIS DE COSTOS DE PRODUCCIÓN EN PLANTA PARA LA MEZCLA CONVENCIONAL Y LA MEZCLA DE INVESTIGACIÓN.

7.1 INTRODUCCIÓN E IMPORTANCIA.

Es preciso tener en cuenta que el costo de producción es uno de los indicadores más importantes a considerar en los proyectos de ingeniería. Por lo tanto, mientras más eficiente sea la labor de éstas, menos recursos se invertirán en su producción y, por consiguiente, menor será la cuantía de los gastos.

El costo de producción debe establecerse en un medidor fiel del aprovechamiento de los recursos materiales, laborales y financieros en el proceso de producción, porque, además, conjuntamente con los indicadores del volumen de realización, determina el nivel de ganancia que obtiene la organización.

El costo constituye, además, la base para la formación de los precios de los productos elaborados. Por ello es tan importante la obtención del máximo de producción, con el mínimo indispensable de gastos, para garantizar así el gradual incremento de las ganancias o utilidades.

Para el presente estudio se analiza los costos de producción de la planta de mezcla asfáltica de la EMMOP-Q, la misma que en condiciones óptimas de funcionamiento produce 150m³ diarios, en los costos analizados no se incluye ningún valor por el concepto de utilidad porque lo que se pretende es determinar el costo neto de producción de la mezcla asfáltica convencional y modificada.

7.2 COSTOS DIRECTOS.

Son aquellos que cambian o fluctúan en relación directa a una actividad o volumen dado. Dicha actividad puede ser referida a producción, su grado de controlabilidad es a corto plazo, por ejemplo: la materia prima cambia, y muy generalmente de acuerdo con la función de producción.

7.2.1 DEFINICIÓN DE RECURSOS Y COMPONENTES.

Las cantidades y rendimientos que se presentan en el análisis de costos de cada mezcla son determinadas para un metro cúbico de producción en planta.

7.2.1.1 CÁLCULO DE LA DOSIFICACIÓN PARA MEZCLA CONVENCIONAL.

MATERIALES	PORCENTAJE
AGREGADO GRUESO	60
AGREGADO FINO	40
CEMENTO ASFÁLTICO	6,3

COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA.

AGREGADOS (%) 93,7

CEMENTO ASFÁLTICO (%) 6,3

COMPOSICIÓN EN PESO DE LOS AGREGADOS.

MATERIALES	PESO (%)
AGREGADO GRUESO	56,22
AGREGADO FINO	37,48

SUMAN 93,7%

PESO UNITARIO ESTANDARIZADO PARA CALCULO DE DOSIFICACIONES 2250 Kg/m³

MATERIALES	HUMEDAD (%)	PESO REAL (%)
AGREGADO GRUESO	0	56,22
AGREGADO FINO	0	37,48

DOSIFICACIÓN PARA UN METRO CÚBICO (m³)

MATERIAL	PESO	P. ESPECIFIC	VOLUMEN	UNIDAD
	Kg	Kg/m ³		
AGREGADO GRUESO	1264,95	2491	0,51	m ³
AGREGADO FINO	843,30	2452	0,35	m ³
CEMENTO ASFÁLTICO	141,75	1012	36,98	gal

CÁLCULO DE COSTO HORARIO DE LA PLANTA DE ASFALTO.

FECHA Noviembre 2012

DATOS DEL EQUIPO

TIPO	PLANTA DE ASFALTO	
POTENCIA (HP)	P	400.00
VALOR DE ADQUISICION US\$	Va	600,000.00
VALOR ACCESORIOS US\$	Vacc	2,000.00
VALOR RESIDUAL US\$	Vr	120,000.00
COTIZACION DOLAR	1	
		TASA DE INTERES ANUAL i 12.00% TASA DE SEGUROS s 2.00% VIDA UTIL ANOS N 10.00 HORAS AÑO Ha 1,700.00 DIESEL(galón) Di 1.04 GASOLINA (galón) G 1.45 LUBRICANTE (ltr) lub 2.00 GRASA (kg) gr 0.50

CONCEPTO	FORMULAS	USD/hora
DEPRECIACION	$D=(Va-Vr)/Ve$	28.24
INTERESES, SEGUROS, MOP	$I=((Va+Vr)*(i+s+MOP))/2*ha$	29.86
M.O. MANTENIMIENTO	$MM=0.23*D*k$	6.49
REPUESTOS	$R=0.7425*D*k$	20.96
DIESEL	$Di=0.04*p*\$/gal$	16.64
LUBRICANTES	$L=(0.00132*lub+0.001gr)*P$	1.26
TOTAL		103.45

CÁLCULO DEL COSTO HORARIO DEL DEPÓSITO DE ASFALTO.

CONCEPTO	INVERSIÓN INICIAL	PORCENTAJE	VIDA ÚTIL	COSTO	COSTO
	50000		(Años)	USD/Mes	USD/Hora
REP. Y MANTENIMIENTO		1%	20	41,67	0,17
SEGUROS		0,50%		20,83	0,09
DEPRECIACIÓN		5,00%		208,33	0,87
				TOTAL	1.13

7.2.1.2 COSTOS DIRECTO PARA MEZCLA CONVENCIONAL.

PROYECTO: COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO ETILENO VINIL ACETATO (EVA).

FECHA: Noviembre/2012.

RUBRO: Mezcla asfáltica convencional.

UNIDAD: m3.

Material.

CONCEPTO	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Subtotal
Asfalto	Gl	36,98	1,45	53,62
Diesel	Gl	10,00	1,02	10,20
Ripio de Cashapamba	m3	0,51	15,51	7,91
Arena de Mulaló	m3	0,35	10,49	3,67
Total Materiales				75,60

Mano de Obra.

DETALLE	CATEGORIA	CANTIDAD	RENDIMIENTO	COSTO	SUBTOTAL
			Horas/Hombre	Hora/Hombre	
Operador de equipo pesado	OEP I	2	0,10	2,50	0,50
Ayudante de maquinaria	Sin Tít.	1	0,05	2,13	0,11
Peón	CAT I	4	0,20	2,00	1,60
Total Mano de Obra					2.21

Equipo y Maquinaria.

DETALLE	RENDIMIENTO	COSTO	SUBTOTAL
	Horas/Equipo	Hora/Equipo	
Planta de Asfalto 80-120TPH	0,05	103,45	5,17
Deposito de Asfalto	0,05	1,13	0,06
Cargadora Frontal 150HP	0,05	35,61	1,78
Total Equipo y Maquinaria			7,01

COSTO DIRECTO = 84,82 DÓLARES.

7.2.1.3 COSTOS DIRECTO PARA MEZCLA MODIFICADA.

PROYECTO: COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMERO ETILENO VINIL ACETATO (EVA).

FECHA: Noviembre/2012.

RUBRO: Mezcla asfáltica modificada.

UNIDAD: m3.

Material.

CONCEPTO	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Subtotal
Asfalto	Gl	35,87	1,45	52,01
Diesel	Gl	12,00	1,02	12,24
Polímero EVA	Kg	4,25	2,11	8,97
Ripio Cashapamba	m3	0,51	15,51	7,91
Arena Mulaló	m3	0,35	10,49	3,67
Total Materiales				85,04

Mano de Obra.

DETALLE	CATEGORIA	CANTIDAD	RENDIMIENTO	COSTO	SUBTOTAL
			Horas/Hombre	Hora/Hombre	
Operador de equipo pesado	OEP I	2	0,10	2,50	0,50
Ayudante de maquinaria	Sin Tít.	1	0,05	2,13	0,11
Peón	CAT I	4	0,20	2,00	1,60
Total Mano de Obra					2.21

Equipo y Maquinaria.

DETALLE	RENDIMIENTO	COSTO	SUBTOTAL
	Horas/Equipo	Hora/Equipo	
Planta de Asfalto 80-120TPH	0,05	10,.45	5,17
Deposito de Asfalto	0,05	1,13	0,06
Cargadora Frontal 150HP	0,05	35,61	1,78
Total Equipo y Maquinaria			7.01

COSTO DIRECTO = 94,26 DÓLARES.

7.3 COSTOS INDIRECTOS Y JUSTIFICACIÓN.

Estos costos están en función del tiempo, es decir, no sufren alteraciones, son constantes, aún cuando se presenten grandes cambios en el volumen de producción, es decir, fluctúan en relación a un período dado; lo importante es que dichos costos no son afectados por cambios de la actividad dentro de un rango relevante.

Para la presente investigación no se realizó un análisis detallado de estos costos debido a que la información que se dispone pertenece a la empresa pública, la misma que no tiene bien definido estos costos y en caso de requerir el porcentaje de influencia de este costo para un análisis total de costo de producción para la empresa privada, cada una de estas dispone de su propio porcentaje de costo indirecto estará en función de la maquinaria, infraestructura, personal, tecnología, capital etc. que cada empresa maneje o disponga.

Otra razón para no realizar el análisis de costos indirectos es que el costo directo es un parámetro de comparación para costo de producción, este costo hace que las mezclas convencional y modificada sean comparadas económicamente de acuerdo a los materiales, mano de obra y equipo que intervienen en cada mezcla.

Con la finalidad de obtener el costo comercial referencial de cada mezcla a continuación se realiza una estimación de costos indirectos.

- **Costos Indirectos.**

Estimación de costo indirecto.

DESCRIPCION	PORCENTAJE
	%
Gastos Generales	5
Seguros, Garantías y amortización	3
Fiscalización	4
Utilidad	10
TOTAL	22

7.4 COSTO UNITARIO.

El costo total unitario es la suma del costo fijo unitario más el costo variable unitario. Estimar el costo total unitario es muy importante, porque consiste en la cotización que se suele hacer para establecer el precio de venta del artículo que se produce. Generalmente se estiman antes de que se realice la producción y entrega de productos. Por eso se les conoce como costos estándar¹⁰

$$CTU = CDU + CIU$$

Donde:

CTU = Costo Total Unitario.

CDU = Costo Directo Unitario.

CIU = Costo indirecto Unitario.

En la investigación se obtuvo que el costo unitario neto de producción es:

CDU (mezcla convencional) = 84,82 USD a nivel de planta = Costo Directo.

¹⁰<http://www.mitecnologico.com/iem/Main/CostoUnitarioDeProductoOLoteDeArticulos>

CDU (mezcla modificada) = 94,26 USD a nivel de planta = Costo Directo.

El costo comercial referencial es:

CTU (mezcla convencional) = $84,82 + (0,22 * 84,82) = 103,48$ USD

CTU (mezcla modificada) = $94,26 + (0,22 * 94,26) = 114,99$ USD

7.5 EQUIPO NECESARIO.

El equipo y maquinaria requerida necesariamente para la producción de mezcla asfáltica convencional es:

- Planta de asfalto 80-120 TPH.
- Deposito de Asfalto.
- Cargadora Frontal 150 HP.

Para la mezcla modificada se utilizará el mismo equipo y maquinaria que para la mezcla convencional teniendo en cuenta que se debe incorporar a la planta de asfalto un dispositivo dosificador de polímero, el cual deberá ser analizando y comprobado en la planta para su correcto funcionamiento.

7.6 DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO.

El rendimiento es el tiempo necesario para realizar una cantidad determinada de trabajo. Influyen directamente en la productividad factores tales como la relación de peso a potencia, la capacidad, el tiempo de transmisión, las velocidades y los costos de operación.

En las plantas de asfalto un factor importante a considerar en el rendimiento es la humedad de los agregados, debido a que a mayor contenido de humedad menor rendimiento de la planta.

En la presente investigación la información que se dispone es la producción diaria de la planta de la EMMOP-Q que es de 150m³/día, por lo que el rendimiento se determina de la siguiente manera:

$$\text{Rendimiento (m}^3/\text{hora)} = \frac{150\text{m}^3}{8\text{ horas}} = 18.75 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}$$

$$\text{Rendimiento (hora / m}^3\text{)} = \frac{1}{18.75 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}} = 0.05 \frac{\text{hora}}{\text{m}^3}$$

El rendimiento de 0.05 hora/m³ es el determinado para la planta de asfalto, y el rendimiento de la mano de obra, maquinaria y equipos será el mismo debido a que estos trabajan en función de la producción en la planta de asfalto.

7.7 COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE LAS DOS MEZCLAS.

Con la finalidad de comparar el costo en obra de las mezclas convencional y modificada se realizaron ejemplos de diseño de pavimento flexible con cada tipo de mezcla, a continuación se presentan los diseños y el análisis económico de la variación de costo por m² de cada mezcla colocada en obra.

EJEMPLO 1: DISEÑO DE ESPESOR DE CARPETA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTO FLEXIBLE CON MEZCLA CONVENCIONAL.

Diseñar un pavimento flexible para un periodo de diseño de 10 años, teniendo en cuenta que se trata de una vía rural , se asume un coeficiente de confiabilidad de 90% y una desviación estándar de 0,45.

No existen suelos expansivos y se diseñaran dispositivos de drenaje para evacuar los excesos de agua en el término de un día.

Se espera que la calidad de la construcción sea excelente como para tener un índice de servicio (P_0) de 4,3 y se ha seleccionado un índice final (P_t) de 2 lo que implica una pérdida total $PSI = 4,3 - 2,0 = 2,3$

El suelo de la sub-rasante presenta, bajo las condiciones de humedad y densidad esperadas, un CBR = 5% ($M_r = 1500 * 5 = 7500\text{psi}$).

Los materiales disponibles para la construcción de las capas de sub-base y base granular tienen CBR de 30% y de 80% respectivamente a los niveles exigidos por las especificaciones, a los cuales corresponden coeficientes estructurales de 0,11 y 0,13 respectivamente.

Para la temperatura media de la zona del proyecto (20°C) se tiene que el módulo resiliente es de 26143 Kg/cm² (366002 psi).

En relación con el drenaje y considerando lo ya expuesto se puede tomar un valor de $m_i = 1,15$ de la Tabla 18.

CALIDAD DEL DRENAJE	% DE TIEMPO DE EXPOSICIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO A NIVEL DE HUMEDAD PRÓXIMOS A LA SATURACIÓN			
	<1%	1-5%	5-25%	>25%
Excelente	1,40-1,35	1,35-1,30	1,30-1,20	1,20
Bueno	1,35-1,25	1,25-1,15	1,15-1,00	1,00
Aceptable	1,25-1,15	1,15-1,05	1,00-0,80	0,80
Pobre	1,15-1,05	1,05-0,80	0,80-0,60	0,60
Muy pobre	1,05-0,95	0,95-0,75	0,75-0,40	0,40

Tabla 18: Valores de mi recomendados para modificar los coeficientes de capas de base y sub-base granulares.

SOLUCIÓN:

1. Se realiza la cuantificación de la composición del tráfico actual de la vía, el mismo que se detalla a continuación:
- **Estimación de Volumen de Tráfico.**

TIPO DE VEHICULO	N° DE VEHÍCULOS
Livianos	73
Camiones de 3 ejes	55
Camiones de 2 ejes	21
Buses	43
Tanqueros	19
TOTAL VEHÍCULOS	211

➤ **Valoración TPDA.**

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PORCENTAJE	FRACCIÓN
Camiones de 3 ejes	55	40	0,40
Camiones de 2 ejes	21	15	0,15
Buses	43	31	0,31
Tanqueros	19	14	0,14
TOTAL	138	100	1,00

➤ **Cálculo del Factor de Carga Equivalente.**

Asumimos un numero estructural $NE = 3,5$ y un nivel de servicio para pavimento Flexible $P = 2,0$.

Con estos valores se entra en el ábaco de la Figura 37 y se obtiene para cada tipo de vehículo el número de ejes equivalentes de 18000lbs por vehículo. Se multiplica este número por su respectivo porcentaje, y la suma de estos productos parciales nos da el factor de carga equivalente incluido el número promedio de ejes para todo el tráfico pesado.

DESCRIPCIÓN	PORCENTAJE	F.E.	F.C.E
Camiones de 3 ejes	0,40	2,10	0,84
Camiones de 2 ejes	0,15	3,00	0,45
Buses	0,31	1,35	0,42
Tanqueros	0,14	6,00	0,84
TOTAL F.C.E.			2,55

➤ **Cálculo del Tráfico Futuro.**

Tasa de crecimiento promedio anual 6%.

$$TPDA_f = TPDA (1+i)^n$$

$$TPDA_f = 138 (1+0,06)^{10}$$

TPDAf = 247 Vehículos.

- Cálculo del Trafico Promedio Total.(TPT)

Vía de 2 carriles.

$$TPT = \left(\frac{TPDAf + TPDAa}{2} \right) * 365 * n * F.C.E * d.$$

$$TPT = \left(\frac{247 + 138}{2} \right) * 365 * 10 * 2,55 * 0,5$$

$$TPT = 895846,88 \approx 0,9 \times 10^6$$

$$TPT = 0,9 \times 10^6 \text{ Ejes Simples de } 8.2 \text{ toneladas.}$$

2. Determinación del módulo resiliente de la sub-rasante mediante la expresión:

$$Mr \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 100 \text{ CBR}$$

$$Mr \text{ (Lb/pulg}^2\text{)} = 1500 \text{ CBR}$$

$$Mr = 1500 * 5 = 7500 \text{ Lb/pulg}^2.$$

3. Determinación de los módulos resiliente de las capas de base y sub-base granular según las Figuras 35 y 34 respectivamente.

El CBR de la sub-base (30%) corresponde a un módulo de elasticidad (E_{SB}) de 14800 psi y un coeficiente estructural $a_3 = 0,11$ (ver Figura 35). El CBR de la base (80%) corresponde a un módulo de elasticidad (E_B) de 28000 psi y un coeficiente estructural $a_2 = 0,13$ (ver Figura 34).

4. Determinación del SN o volumen estructural del pavimento a partir del módulo resiliente de la sub-rasante y de los datos básicos del problema; mediante el uso de la gráfica de diseño que presenta la Figura 36. El resultado que se lee en la gráfica es $SN = 3,4$
5. Determinar el espesor necesario de concreto asfáltico a partir del módulo resiliente de la base y mediante el uso de la Figura 36, haciendo el mismo procedimiento del cálculo anterior, pero entrando en la gráfica con el módulo resiliente de la base. De esta forma se obtiene que SN_1 (módulo estructural sobre la base) = 2,0

Teniendo en cuenta que $SN_1 = a_1 D_1$ y que el valor de a_1 se obtiene de la Figura 33 entrando en las abscisas con el valor del módulo de elasticidad del concreto asfáltico y leyendo el valor de a_1 en el eje de las ordenadas el cual resulta ser $a_1 = 0,40$.

Entonces tenemos:

$$D1 = \frac{SN1}{a1} = \frac{2}{0,40}$$

$D1 = 5,00$ pulg de espesor de concreto asfáltico.

Conforme a experiencias locales se tiene que las carpetas asfálticas con mezclas convencionales son alrededor de 3plg. Entonces $D1 = 3$ plg.

$$SN1^* = a1 * D1_{\text{corregido}} = 0,40 * 3$$

$$SN1^* = 1,20$$

6. Determinar el espesor que debe tener la base granular a partir del módulo resiliente de la capa de sub-base (14800psi), mediante el empleo de la Figura 36 pero entrando en ella con el Mr de la sub-base. El valor que se obtiene es $SN2=2,7$ y corresponde al volumen estructural que aporta la base granular y el concreto asfáltico.

Teniendo en cuenta que es conocido el valor de $SN1^*$ (1,20), entonces, el valor del coeficiente estructural de la base se obtiene de la siguiente forma:

$$SN \text{ (Base Granular)} = 2,7 - 1,20 = 1,50$$

$$SN \text{ (Base Granular)} = a2 * D2 * m2 \text{ entonces se tendrá}$$

$$D2 = SN \text{ (Base Granular)} / a2 * m2$$

$$D2 = \frac{1,50}{0,13 * 1,15} = 10,0 \text{ pulg.}$$

Conforme a experiencias locales se tiene que las bases granulares son alrededor de 7 plg. Entonces $D2 = 7$ plg.

$$SN^* \text{ (Base Granular)} = a2 * D2_{\text{elegido}} * m2 = 0,13 * 7 * 1,15$$

$$SN^* \text{ (Base Granular)} = 1,05$$

7. Determinación del espesor de la sub-base a partir del número estructural del pavimento, de la carpeta asfáltica y de la base granular que se lo hace de la siguiente forma:

$$SN \text{ (Sub-base)} = 3,4 - (1,20 + 1,05) = 1,15, \text{ entonces,}$$

$$SN \text{ (Sub-base)} = a3 * D3 * m, \text{ despejando } m3 \text{ se obtiene que;}$$

$$D3 = SN \text{ (Sub-base)} / a3 * m3$$

$$D3 = \frac{1,15}{0,11 * 1,15} = 9,1 \text{ pulg.}$$

DISEÑO RESULTANTE FINAL:

DESCRIPCION DE MATERIALES	COEFICIENTE ESTRUCTURAL	COEFICIENTE DE DRENAJE	ESPESOR		APORTE NE
	1/cm	mi	Plg	Cm	
Capa de Rodadura	0,40		3	8	1,20
Base clase 2	0,13	1,15	7	18	1,05
Sub- Base clase 2	0,11	1,15	9	23	1,15
TOTAL			19	49	3.4

EJEMPLO 2: DISEÑO DE ESPESOR DE CARPETA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTO FLEXIBLE CON MEZCLA MODIFICADA.

Con los datos del ejemplo 1 y módulo resiliente del concreto asfáltico de 57700 Kg/cm² (807800 psi). Determinar los espesores del pavimento.

SOLUCIÓN:

Para la solución de este ejemplo se repite los pasos del ejemplo 1 a partir del numeral 5.

5. Determinar el espesor necesario de concreto asfáltico a partir del módulo resiliente de la base y mediante el uso de la Figura 36, haciendo el mismo procedimiento del cálculo anterior, pero entrando en la gráfica con el módulo resiliente de la base. De esta forma se obtiene que SN_1 (módulo estructural sobre la base) = 2,0

Teniendo en cuenta que $SN_1 = a_1 D_1$ y que el valor de a_1 se obtiene de la Figura 33 entrando en las abscisas con el valor del módulo de elasticidad del concreto asfáltico y leyendo el valor de a_1 en el eje de las ordenadas el cual resulta ser $a_1=0,50$.

Entonces tenemos:

$$D1 = \frac{SN1}{a1} = \frac{2}{0,5}$$

$D1 = 4,0$ plg de espesor de concreto asfáltico.

Conforme a las propiedades de la mezcla modificada se puede reducir las carpetas asfálticas a 2 plg. Entonces $D1 = 2$ plg.

$$SN1^* = a1 * D1_{\text{corregido}} = 0,5 * 2$$

$$SN1^* = 1,0$$

6. Determinar el espesor que debe tener la base granular a partir del módulo resiliente de la capa de sub-base (14800psi), mediante el empleo de la Figura 36 pero entrando en ella con el Mr de la sub-base. El valor que se obtiene es $SN2=2,7$ y corresponde al volumen estructural que aporta la base granular y el concreto asfáltico.

Teniendo en cuenta que es conocido el valor de $SN1^*$ (1,0), entonces, el valor del coeficiente estructural de la base se obtiene de la siguiente forma:

$$SN \text{ (Base Granular)} = 2,7 - 1,0 = 1,70$$

$$SN \text{ (Base Granular)} = a2 * D2^m \text{ entonces se tendrá}$$

$$D2 = SN \text{ (Base Granular)} / a2^m$$

$$D2 = \frac{1,70}{0,13 * 1,15} = 11,37 \text{ pulg.}$$

Conforme a experiencias locales se tiene que las bases granulares son alrededor de 7 plg. Entonces $D2 = 7$ plg.

$$SN^* \text{ (Base Granular)} = a2 * D2_{\text{elegido}}^m = 0,13 * 7^1,15$$

$$SN^* \text{ (Base Granular)} = 1,05$$

7. Determinación del espesor de la sub-base a partir del número estructural del pavimento, de la carpeta asfáltica y de la base granular que se lo hace de la siguiente forma:

$$SN \text{ (Sub-base)} = 3,4 - (1,0 + 1,05) = 1,35, \text{ entonces,}$$

$$SN \text{ (Sub-base)} = a3 * D3^m, \text{ despejando } m3 \text{ se obtiene que;}$$

$$D3 = SN \text{ (Sub-base)} / a3^m$$

$$D3 = \frac{1,35}{0,11 * 1,15} = 10,60 \text{ pulg.}$$

DISEÑO RESULTANTE FINAL:

DESCRIPCION DE MATERIALES	COEFICIENTE ESTRUCTURAL	COEFICIENTE DE DRENAJE	ESPESOR		APORTE NE
	1/cm	mi	Plg	Cm	
Capa de Rodadura	0.5		2	5	1,00
Base clase 2	0,13	1,15	7	18	1,05
Sub- Base clase 2	0,11	1,15	11	28	1,35
TOTAL			20	51	3,4

TABLA 19: ANÁLISIS DE COSTOS POR M² PARA PAVIMENTO CON MEZCLA CONVENCIONAL.

DESCRIPCIÓN	ESPESOR	CANTIDAD/m2	COSTO UNITARIO	SUBTOTAL
	Plg	m3	m3	
Sub- Base clase 2	9	0,2286	18,92	4,33
Base clase 2	7	0,1778	21,01	3,74
Capa de Rodadura	3	0,0762	103,48	7,78
TOTAL				15,85

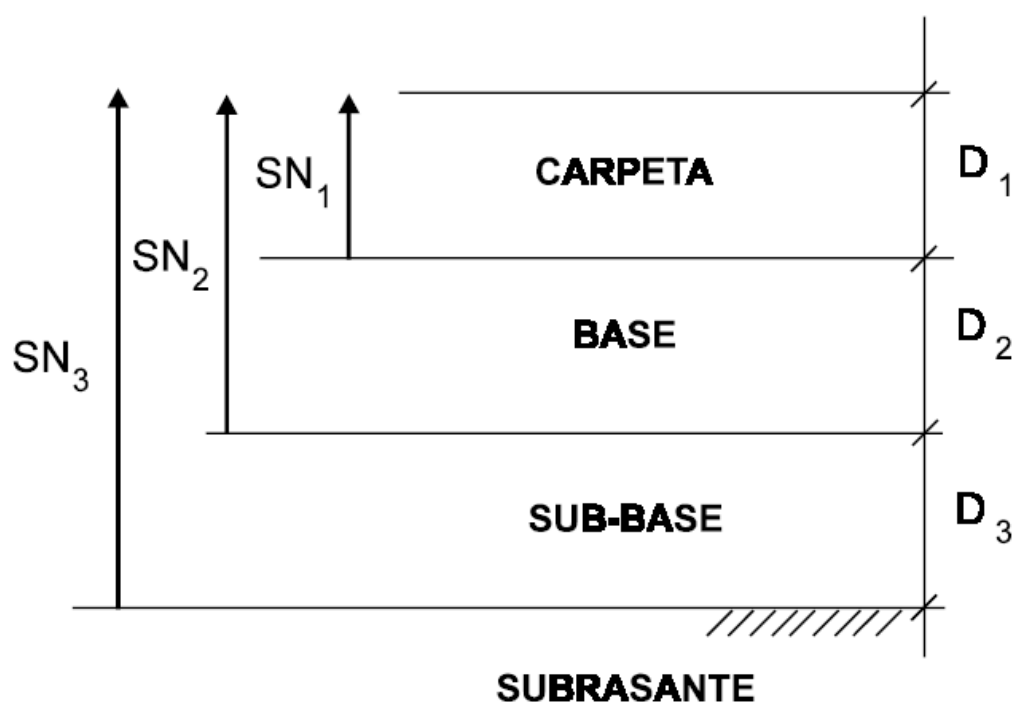
TABLA 20: ANÁLISIS DE COSTOS POR M² PARA PAVIMENTO CON MEZCLA MODIFICADA.

DESCRIPCIÓN	ESPESOR	CANTIDAD/m2	COSTO UNITARIO	SUBTOTAL
	Plg	m3	m3	
Sub- Base clase 2	11	0,2794	18,92	5,29
Base clase 2	7	0,1778	21,01	3,74
Capa de Rodadura	2	0,0508	114,99	5,94
TOTAL				14,97

Para elaborar las Tablas 19 y 20 el costo directo de la base y sub-base son los que registra la cámara de la construcción de Quito a los cuales se aumento en 22 por ciento por concepto de costo indirecto. Aquí se analiza solo el costo de materiales para la construcción de un metro cuadrado de pavimentos utilizando la mezcla convencional y modificada, debido a que estos son los únicos recursos que influyen en el análisis por su variación en cantidad y costo.

Como se puede notar en la Tabla 19 y 20 el costo por m² de pavimento terminado fabricado con mezcla modificada tiene un costo de 14,97 USD y con mezcla convencional es de 15.85 USD, generando una diferencia en costo de 0,88 USD, lo que implica un ahorro de 5,5% en costo de una obra de pavimentación.

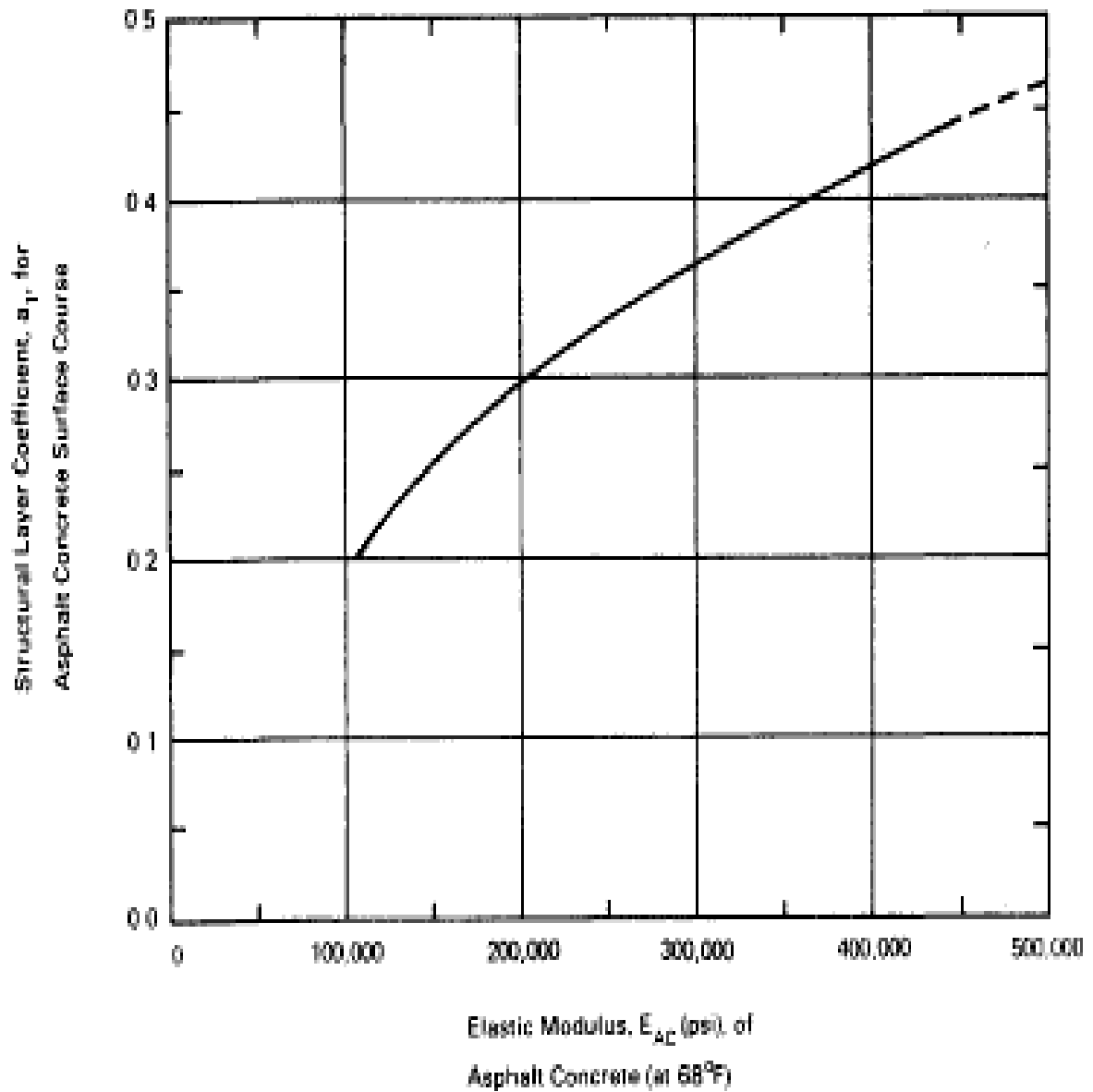
ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.



- En la figura 32 se muestra la conformación de las capas para un pavimento flexible.

ABACOS DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS FLEXIBLES.

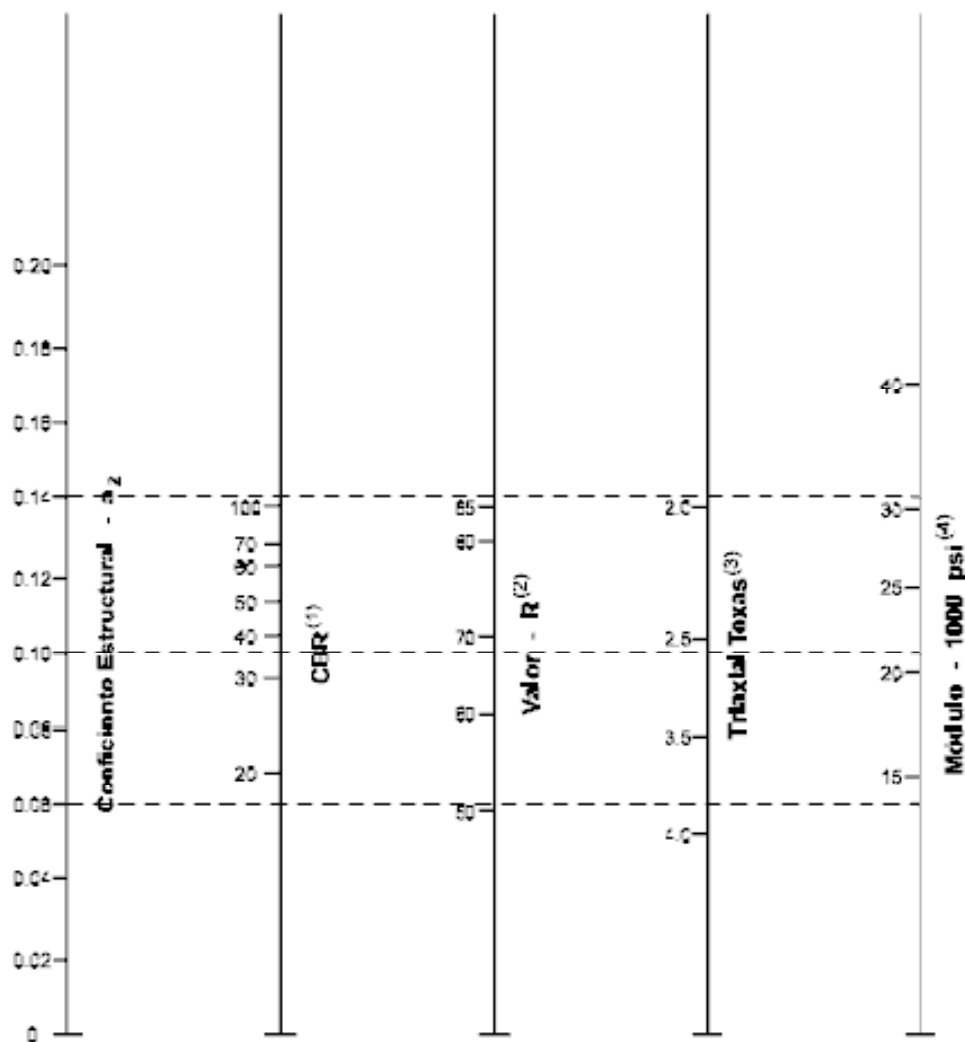
Figura 33: Gráfica para hallar a_1 en función del módulo resiliente del concreto asfáltico.



Utilización del ábaco:

En el eje de las abscisas ingresamos con el valor del modulo resiliente, proyectamos verticalmente hasta la curva, desde la intersección proyectamos horizontalmente al eje de las ordenadas y determinamos el valor de a_1 .

Figura 34: Variación de los Coeficientes “a2”, con diferentes parametros de resistencia de la Base Granular.



(1) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Illinois.

(2) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de California, Nuevo México y Wyoming.

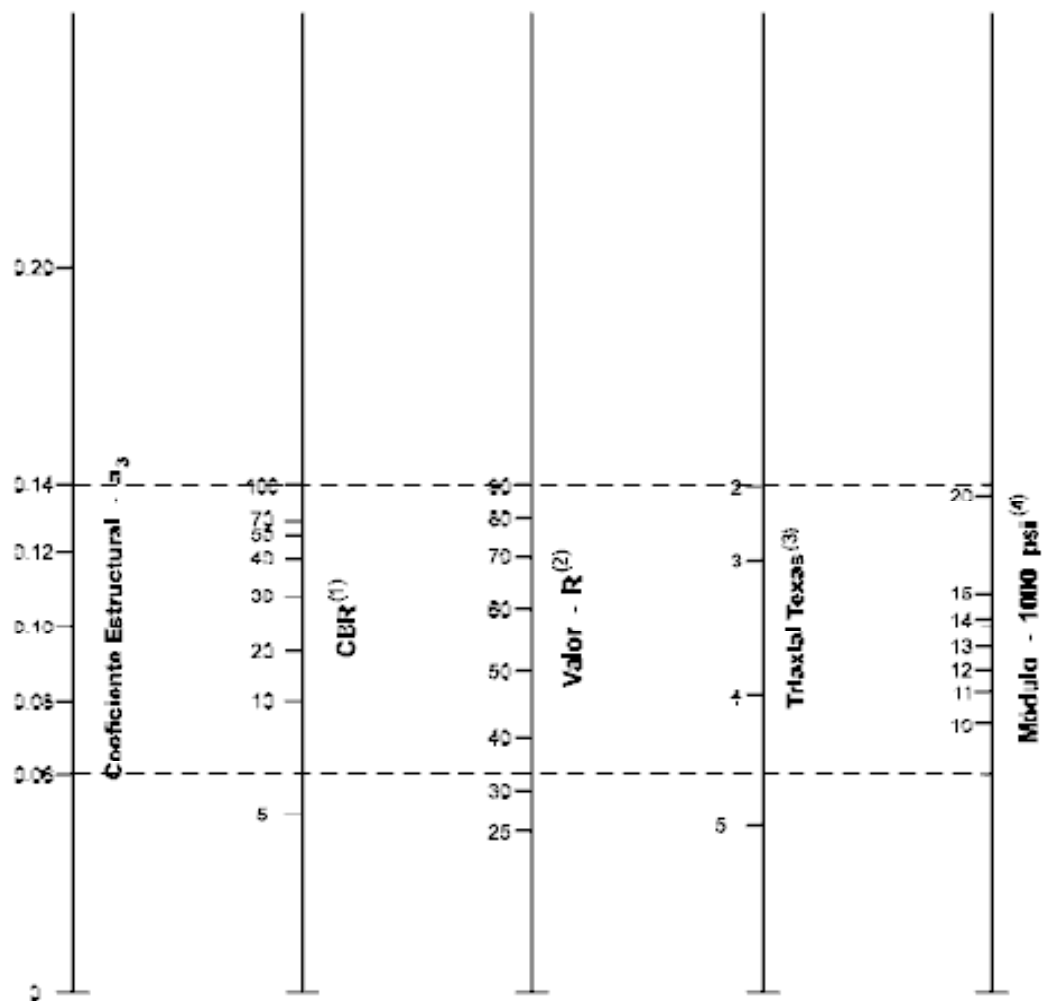
(3) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Texas.

(4) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

Utilización del ábaco:

Con el valor de CBR proyectamos horizontalmente para determinar a_2 y el módulo resiliente.

Figura 35: Variación de los Coeficientes “a3”, con diferentes parametros de resistencia de la Sub-Base Granular.

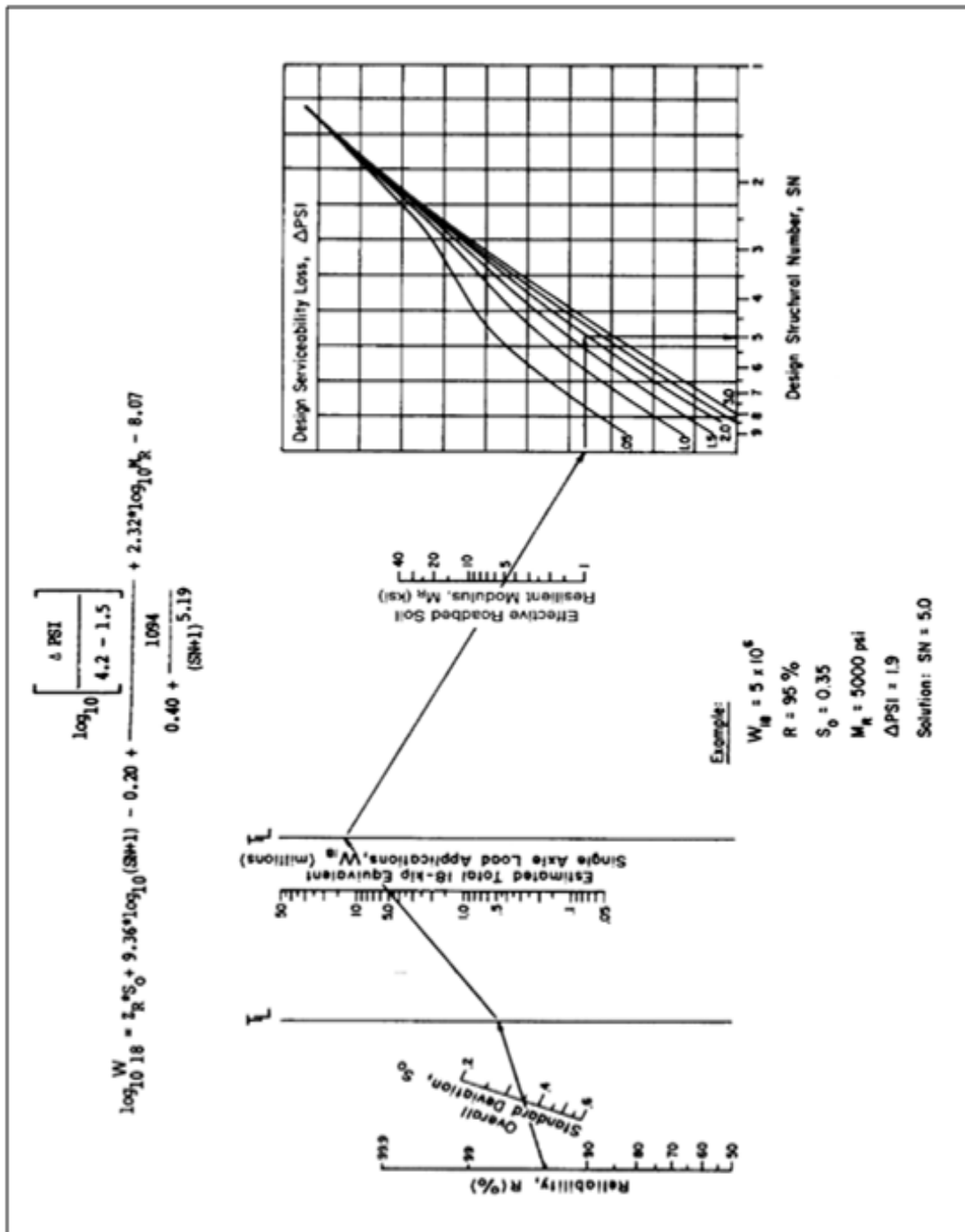


- (1) Escala derivada de correlaciones de Illinois
- (2) Escala derivada de correlaciones obtenidas del Instituto del Asfalto, California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada de correlaciones obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

Utilización del ábaco:

Con el valor de CBR proyectamos horizontalmente para determinar a3 y el módulo resiliente.

Figura 36: Nomograma de Diseño de Pavimentos Flexibles.

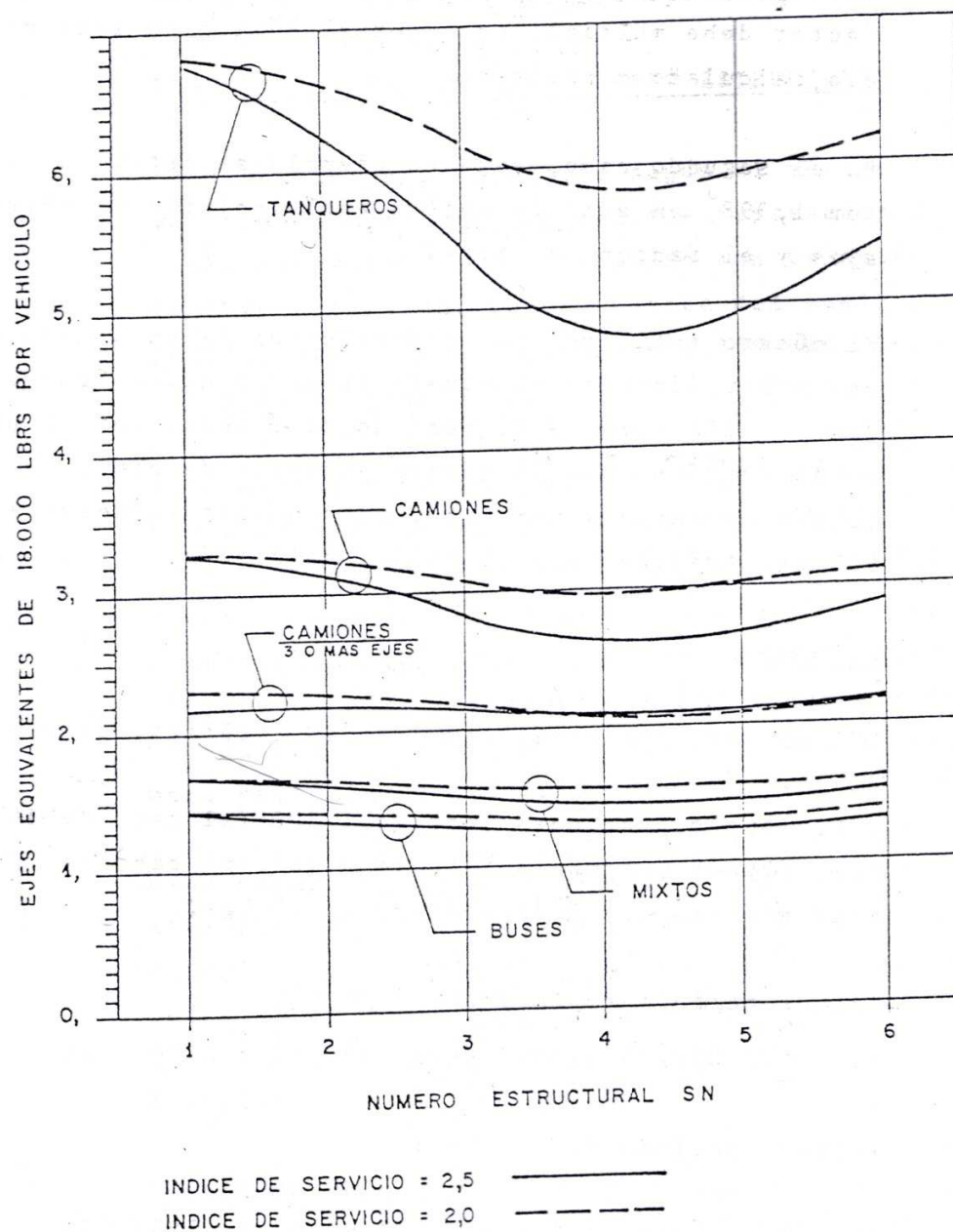


Con los datos de ejes equivalente (W_{18}), confiabilidad (R), desviación estándar (S_o), módulo resiliente (M_R), pérdida del nivel de servicio (ΔPSI). Ingresamos al ábaco siguiendo las flechas que se indican en el ejemplo (de izquierda a derecha).

FIGURA 37: PROMEDIO DE FACTORES DE CARGA EQUIVALENTE.

DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

METODO AASTHO



CAPITULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

8.1 CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN.

1. De acuerdo a los ensayos realizados en pruebas de laboratorio se determinó que se tiene una notable mejora en las propiedades mecánicas tales como módulo dinámico elástico, resistencia a la tensión indirecta, resistencia a la pérdida por desgaste, estabilidad, flujo y susceptibilidad térmica de la mezcla modificada con respecto a la mezcla convencional, por lo que se puede asegurar que los daños viales van a disminuir con la utilización de esta mezcla.
2. La mezcla modificada óptima de la investigación quedó constituida por 60 por ciento de agregado grueso, 40 por ciento de agregado fino, 6,3 por ciento de asfalto y 3 por ciento de polímero EVA (en peso de asfalto) .
3. La mejora más significativa es en el módulo dinámico elástico ya que este se incrementa hasta en un 40 por ciento con respecto a la mezcla convencional, siendo esta una de las propiedades más importantes en el diseño de pavimentos, generará carpetas asfálticas de menor espesor con la misma capacidad estructural tal como se demuestra con los ejemplos de diseño de pavimentos flexibles realizados en el capítulo 7.
4. El módulo dinámico elástico es la propiedad que mide la resistencia a las deformaciones; en la mezcla investigada se tiene que el módulo dinámico es ampliamente superior al de la mezcla convencional por lo que se asegura que este tipo de mezcla va a tener características de mayor durabilidad como de vida útil.
5. Un aspecto muy importante a considerar en la construcción de obras viales es el factor económico; como se observó en el numeral 7.7 del capítulo 7 la diferencia de costos en la fabricación de pavimentos con mezcla modificada frente a la mezcla convencional tiene un ahorro en costo del 5,5 por ciento, lo que demuestra la conveniencia de la utilización de la mezcla modificada y teniendo en cuenta que por sus propiedades físico – mecánicas la vida útil será mayor el ahorro será aún mayor.

6. Los resultados obtenidos con la aplicación del ensayo de tensión indirecta nos muestran la posibilidad de emplear este ensayo en control de fabricación de mezclas asfálticas, ya que sus resultados se traducen en características mecánicas del pavimento y esto nos entrega una idea mejor respecto del comportamiento esperado para cualquier pavimento. Además es un ensayo de fácil realización e interpretación que no necesita de equipo sofisticado para su ejecución ya que se realiza con el equipo Marshall.
7. Anteriormente las únicas propiedades que servían como elemento de juicio para caracterizar una mezcla eran la densidad estabilidad y el flujo, como se pudo comprobar con esta investigación la caracterización dinámica de las mezclas en lo referente a módulos dinámicos da información bastante clara del comportamiento de la mezcla en servicio y durante su vida útil.
8. Las temperaturas de ensayo juegan un papel muy importante en los resultados, haciéndose evidente un descenso drástico en los módulos con el aumento de la temperatura.
9. Las temperaturas de fabricación y tendido de la mezcla asfáltica deben ser las adecuadas debido a que cuando el asfalto está frío no hay adherencia y la mezcla se vuelve porosa lo cual permite el ingreso del agua ocasionando daños en las capas internas del pavimento, y cuando la temperatura es elevada el asfalto se oxida produciendo la quemadura.
10. Se determinó que porcentajes de adición de polímero mayores al 5 por ciento no muestran resultados satisfactorios.
11. Para llegar a determinar todos los resultados que nos permitan emitir conclusiones reales se ensayaron tres briquetas por dosificación utilizada en cada ensayo, fabricadas con materiales representativos de todo el stock disponible, esto con la finalidad de obtener un resultado promedio correcto descartando datos erróneos, por lo que se fabricaron un total de 128 briquetas tipo Marshall para toda la investigación.

8.2 RECOMENDACIONES PARA EL USO.

1. Este trabajo debe ser complementado con un tramo de prueba que permita comprobar en obra el funcionamiento y la mejora en las propiedades de la mezcla obtenida en el laboratorio.
2. Para garantizar la calidad de las mezclas asfálticas el personal encargado de la producción debe tener la preparación adecuada para evitar los daños de fabricación y colocación en obra.
3. Para obtener mayor información se debe realizar más ensayos trabajando con temperaturas de fabricación diferentes en base a los resultados óptimos obtenidos, estos resultados deben ser comparados con la normativa con la finalidad de llegar a determinar una curva de compactación, la misma que servirá para el tendido de la carpeta asfáltica en obra.
4. Se debe tener en cuenta que el asfalto que llega a las plantas de producción de mezclas asfálticas varía en sus propiedades en cada abastecimiento, por lo que se recomienda realizar ensayos básicos de caracterización tales como punto de ablandamiento, penetración y peladura antes de empezar a trabajar con este asfalto.
5. Para la producción en planta el stock de agregados deberá estar cubierto, esto para evitar que material fino se adhiera al agregado grueso cuando exista precipitaciones, lo que afecta la granulometría de la mezcla de agregados creando un exceso de finos.
6. Para tener mayor durabilidad de las carpetas asfálticas estudios estadísticos recomiendan dar mantenimiento a los seis meses de su colocación debido a que en este tiempo ya se estabilizan los vacíos por la carga de tráfico recibida.
7. En el proceso de producción en planta se debe investigar y hacer las pruebas necesarias para dosificar e incorporar el polímero EVA en el porcentaje antes indicado dentro de la mezcla.
8. Para cada ensayo fabricar briquetas hasta encontrar un punto evidentemente óptimo, que demuestre la obtención de resultados confiables.

BIBLIOGRAFÍA:

1. C.P.A (Comisión Permanente del Asfalto). Boletín 096. Jornadas Técnicas del Asfalto. Ciudad de la Plata Argentina. Contrastes. 1999. pág 40.
2. Ing. Aníbal Ávila, Pavimentos Flexibles y Rígidos. Pág 138.
3. ASPHALT INSTITUTE Serie de Manuales No 22 (MS -22). Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente. Edición 22. Estados Unidos. FHWA. 1992. pág 275.
4. MOP-001-F-2002. Tomo I. Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes. Ecuador.
5. MOP-001-F-2002. Tomo II. Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes.
6. RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Pavimentos Flexibles, Problemática Metodologías. Publicación Técnica 104 de Diseño y Tendencias. México. San Fandil. 1998. Pág 145.
7. ASOPAC (Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia). Cartilla del Pavimento Asfáltico. Primera Edición. Colombia. 2005. Pág 52.
8. WAHR, Carlos. Control de Calidad de Mezclas. Primera Edición. Chile. 2006. Pág 9.
9. DÁVILA M, Juan Manuel. Análisis Comparativo de Modulo Resiliente y Ensayos de Deformación Permanente en Mezclas Asfálticas del Tipo (MDC2) en Briquetas Compactadas con Matillo Marshall y Compactador Giratorio. Primera Edición. Colombia. Universidad Javeriana. 2005. pág 173.

10. BOTASSO H.G., GONZÁLEZ R.O., Rosato M., Rebollo O., Rivera J.J. Asfaltos Modificados Fijación de Residuos Contaminantes. Primera Edición. Buenos Aires Argentina. 1996. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Plata. Pág 27.
11. RODRÍGUEZ GALLEGO, Karina Liset. Mejora de una Mezcla Drenante con Incorporación de Caucho e Icopor. Primera Edición. Colombia Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería. Bogotá D.C.2005.pág 152.
12. AVELLÁN CRUZ, Martha Diana. Asfaltos Modificados con Polímeros. Primera Edición. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 2007. Pág 162.
13. Ministerio de transporte instituto nacional de vías. Normas de ensayo de materiales para carreteras. República de Colombia. 1998. Pág 1491.
14. Ing. MINAYA GONZALES, Silene. Manual de Laboratorio Ensayos para Pavimentos, Volumen I. Perú.2001.pág 188.
15. MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Segunda edición. Colombia. Universidad Católica de Colombia. 1998. Pág 250.
16. Ing. Pontón Carlos. Apuntes de Clase. Ecuador. 2010. Pág 80

PAGINAS DE INTERNET.

- http://bvs.sld.cu/revistas/aci/vol4_2_96/aci06296.htm
- <http://upcommons.upc.edu/pfc/bistream/2009.1/3252/9/50777-9.pdf>.
- <http://www.mitecnologico.com/iem/Main/CostoUnitarioDeProductoOLoteDeArticulos>.
- www.monografias.com
- [www. POLIMEROS.com](http://www.POLIMEROS.com).

ANEXO 1

ESTABILIDAD MARSHALL EN (KILOGRAMOS) (EQUIPO ELE.)

Lectura			Lectura			Lectura			Lectura			Lectura			Lectura			Lectura			Lectura				
Dial	Med.	Dial	Med.	Dial	Med.	Dial	Med.	Dial	Med.	Dial	Med.	Dial	Med.	Dial	Med.	Dial	Med.	Dial	Med.	Dial	Med.	Dial	Med.		
100	342	156	529	212	715	208	902	324	1089	330	1276	436	1462	492	1649	548	1836	604	2022	660	2209	716	2396	772	2582
101	345	157	531	213	719	209	905	325	1092	331	1279	437	1466	493	1652	549	1839	605	2026	661	2212	717	2399	773	2586
102	349	158	535	214	722	210	909	326	1096	332	1282	438	1469	494	1656	550	1842	606	2029	662	2216	718	2402	774	2589
103	352	159	539	215	725	211	912	327	1099	333	1286	439	1472	495	1659	551	1846	607	2032	663	2219	719	2406	775	2592
104	355	160	542	216	729	212	915	328	1102	334	1289	440	1476	496	1662	552	1849	608	2036	664	2222	720	2409	776	2596
105	359	161	545	217	732	213	919	329	1106	335	1292	441	1479	497	1666	553	1852	609	2039	665	2226	721	2412	777	2599
106	362	162	549	218	735	214	922	330	1109	336	1296	442	1482	498	1669	554	1856	610	2042	666	2229	722	2416	778	2602
107	36	163	551	219	739	215	925	331	1112	337	1299	443	1486	499	1672	555	1859	611	2046	667	2232	723	2419	779	2606
108	369	164	555	220	742	216	929	332	1116	338	1302	444	1489	500	1676	556	1862	612	2049	668	2236	724	2422	780	2609
109	372	165	559	221	745	217	932	333	1119	339	1306	445	1492	501	1679	557	1866	613	2052	669	2239	725	2426	781	2612
110	375	166	561	222	749	218	935	334	1122	340	1309	446	1496	502	1682	558	1869	614	2056	670	2242	726	2429	782	2616
111	379	167	565	223	752	219	939	335	1126	341	1312	447	1499	503	1686	559	1872	615	2059	671	2246	727	2432	783	2619
112	382	168	569	224	755	220	942	336	1129	342	1316	448	1401	504	1689	560	1876	616	2062	672	2249	728	2436	784	2622
113	385	169	571	225	759	221	945	337	1132	343	1319	449	1506	505	1692	561	1879	617	2066	673	2252	729	2439	785	2626
114	389	170	575	226	762	222	949	338	1136	344	1322	450	1509	506	1696	562	1882	618	2069	674	2256	730	2442	786	2629
115	392	171	579	227	765	223	952	339	1139	345	1326	451	1512	507	1699	563	1886	619	2072	675	2259	731	2446	787	2632
116	395	172	581	228	769	224	956	340	1142	346	1329	452	1516	508	1702	564	1889	620	2076	676	2262	732	2449	788	2636
117	399	173	585	229	772	225	959	341	1146	347	1332	453	1519	509	1706	565	1892	621	2079	677	2266	733	2452	789	2639
118	402	174	589	230	775	226	962	342	1149	348	1336	454	1522	510	1709	566	1896	622	2082	678	2269	734	2456	790	2642
119	405	175	591	231	779	227	966	343	1152	349	1339	455	1526	511	1712	567	1899	623	2086	679	2272	735	2459	791	2646
120	409	176	595	232	782	228	969	344	1156	400	1342	456	1529	512	1716	568	1902	624	2089	680	2276	736	2462	792	2649
121	412	177	599	233	785	229	972	345	1159	401	1346	457	1532	513	1719	569	1906	625	2092	681	2279	737	2466	793	2652
122	415	178	601	234	789	230	976	346	1162	402	1349	458	1536	514	1722	570	1909	626	2096	682	2282	738	2469	794	2656
123	419	179	605	235	792	231	979	347	1166	403	1352	459	1539	515	1726	571	1912	627	2099	683	2286	739	2472	795	2659
124	422	180	609	236	795	232	982	348	1169	404	1356	460	1542	516	1729	572	1916	628	2102	684	2289	740	2476	796	2662
125	425	181	611	237	799	233	986	349	1172	405	1359	461	1546	517	1732	573	1919	629	2106	685	2292	741	2479	797	2666
126	429	182	615	238	802	234	989	350	1176	406	1362	462	1549	518	1736	574	1922	630	2109	686	2296	742	2482	798	2669

117	432	183	619	259	805	295	992	351	1179	407	1366	463	1552	519	1759	575	1926	631	2112	687	2299	743	2486	799	2672
118	435	184	622	260	809	296	996	352	1182	408	1369	464	1556	520	1762	576	1929	632	2116	688	2302	744	2489	800	2676
119	439	185	625	261	812	297	999	353	1186	409	1372	465	1559	521	1766	577	1932	633	2119	689	2306	745	2492	801	2679
120	442	186	629	262	815	298	1002	354	1189	410	1376	466	1562	522	1769	578	1936	634	2122	690	2309	746	2496	802	2682
121	445	187	632	263	819	299	1006	355	1192	411	1379	467	1566	523	1772	579	1939	635	2126	691	2312	747	2499	803	2686
122	449	188	635	264	822	300	1009	356	1196	412	1382	468	1569	524	1776	580	1942	636	2129	692	2316	748	2502	804	2689
123	452	189	639	265	825	301	1012	357	1199	413	1386	469	1572	525	1779	581	1946	637	2132	693	2319	749	2506	805	2692
124	455	190	642	266	829	302	1016	358	1202	414	1389	470	1576	526	1782	582	1949	638	2136	694	2322	750	2509	806	2696
125	459	191	645	267	832	303	1019	359	1206	415	1392	471	1579	527	1786	583	1952	639	2139	695	2326	751	2512	807	2699
126	462	192	649	268	835	304	1022	360	1209	416	1396	472	1582	528	1789	584	1956	640	2142	696	2329	752	2516	808	2702
127	465	193	652	269	839	305	1026	361	1212	417	1399	473	1586	529	1792	585	1959	641	2146	697	2332	753	2519	809	2706
128	469	194	655	270	842	306	1029	362	1216	418	1402	474	1589	530	1796	586	1962	642	2149	698	2336	754	2522	810	2709
129	472	195	659	271	845	307	1032	363	1219	419	1406	475	1592	531	1799	587	1966	643	2152	699	2339	755	2526	811	2712
130	473	196	662	272	849	308	1036	364	1222	420	1409	476	1596	532	1802	588	1969	644	2156	700	2342	756	2529	812	2716
131	479	197	665	273	852	309	1039	365	1226	421	1412	477	1599	533	1806	589	1972	645	2159	701	2346	757	2532	813	2719
132	482	198	669	274	855	310	1042	366	1229	422	1416	478	1602	534	1809	590	1976	646	2162	702	2349	758	2536	814	2722
133	485	199	672	275	859	311	1046	367	1232	423	1419	479	1606	535	1812	591	1979	647	2166	703	2352	759	2539	815	2726
134	489	200	675	276	862	312	1049	368	1236	424	1422	480	1609	536	1816	592	1982	648	2169	704	2356	760	2542	816	2729
135	492	201	679	277	865	313	1052	369	1239	425	1426	481	1612	537	1819	593	1986	649	2172	705	2359	761	2546	817	2732
136	495	202	682	278	869	314	1056	370	1242	426	1429	482	1616	538	1822	594	1989	650	2176	706	2362	762	2549	818	2736
137	499	203	685	279	872	315	1059	371	1246	427	1432	483	1619	539	1826	595	1992	651	2179	707	2366	763	2552	819	2739
138	502	204	689	280	875	316	1062	372	1249	428	1436	484	1622	540	1829	596	1996	652	2182	708	2369	764	2556	820	2742
139	505	205	692	281	879	317	1066	373	1252	429	1439	485	1626	541	1832	597	1999	653	2186	709	2372	765	2559	821	2746
140	509	206	695	282	882	318	1069	374	1256	430	1442	486	1629	542	1836	598	2002	654	2189	710	2376	766	2562	822	2749
141	512	207	699	283	885	319	1072	375	1259	431	1446	487	1632	543	1839	599	2006	655	2192	711	2379	767	2566	823	2752
142	515	208	702	284	889	320	1076	376	1262	432	1449	488	1636	544	1842	600	2009	656	2196	712	2382	768	2569	824	2756
143	519	209	705	285	892	321	1079	377	1266	433	1452	489	1639	545	1846	601	2012	657	2199	713	2386	769	2572	825	2759
144	522	210	709	286	895	322	1082	378	1269	434	1456	490	1642	546	1849	602	2016	658	2202	714	2389	770	2576	826	2762
145	525	211	712	287	899	323	1086	379	1272	435	1459	491	1646	547	1852	603	2019	659	2206	715	2392	771	2579	827	2766

ANEXO 2

FACTORES DE CORRECCIÓN PARA CALCULAR LA ESTABILIDAD CORREGIDA.

Factores Corrección Estabilidad		
VOLUMEN DE LA PROBETA EN cm ³		FACTOR DE CORRECCIÓN
200	213	5.56
214	225	5
226	237	4.55
238	250	4.17
251	264	3.85
265	276	3.57
277	289	3.33
290	301	3.03
302	316	2.78
317	328	2.5
329	340	2.27
341	353	2.08
354	367	1.92
368	379	1.79
380	392	1.67
393	405	1.56
406	420	1.47
421	431	1.39
432	443	1.32
444	456	1.25
457	470	1.19
471	482	1.14
483	495	1.09
496	508	1.04
509	522	1
523	535	0.96
536	546	0.93
547	559	0.89
560	573	0.86
574	585	0.83
586	598	0.81
599	610	0.78
611	625	0.76

ANEXOS 3